



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

**« Διαχειριστικά Σενάρια και Προσδιορισμός της Ζώνης
Υφαλμύρισης Δήμου Σητείας Λασιθίου με Χρήση
Μοντέλων Ροής Υπογείων Υδάτων και Μετρήσεων Πεδίου.»**

Κοπριτέλη Αναστασία

Εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Π. Γεώργιος (Επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Διαμαντόπουλος Ευάγγελος

Χανιά, Οκτώβριος 2007

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Καρατζά Π. Γεώργιο, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε και την άψογη συνεργασία του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής καθηγητές κ.Νικολαΐδη Νικόλαο και κ.Διαμαντόπουλο Ευάγγελο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Δ.Ε.Υ.Α. Σητείας για τις πολύτιμες πληροφορίες που μας παρείχε.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
1. Υπόγεια Υδραυλική	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Υδροφορείς και κατάταξή τους.....	7
1.3 Παράμετροι υδροφορέων.....	9
1.4 Βασικές αρχές της υπόγειας ροής.....	11
Υδραυλική αγωγιμότητα.....	13
Ομοιογένεια και ισοτροπία.....	15
1.5 Γενική μορφή του νόμου Darcy.....	16
2. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης	18
2.1 Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων.....	18
2.2 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού.....	20
2.3 Αναλυτικές σχέσεις	21
2.4 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg.....	22
2.5 Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας	23
2.6 Ακίνητη διεπιφάνεια σε κατακόρυφο επίπεδο.....	23
2.6.1 Περιορισμένος υδροφορέας.....	24
2.6.2 Φρεάτιος υδροφορέας.....	25
2.7 Υπολογιστικές μέθοδοι.....	26
2.8 Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρισης.....	26
3. Μοντελοποίηση κίνησης υπογείων υδάτων	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Πρωτόκολλο μοντελοποίησης	29
3.3 Βασικές εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι.....	31
1.Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).....	31
2.Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint).....	32
3.4 Αριθμητικές μέθοδοι.....	35
3.5 Θεμελιώδες μοντέλο και κατασκευή πλέγματος.....	36
3.6 Σχεδιασμός πλέγματος.....	37
3.7 Προσδιορισμός παραμέτρων και Μεταφορά τους στο πλέγμα.....	40
3.8 Οριακές συνθήκες.....	41

4. Περιγραφή του μοντέλου PTC	47
4.1 Εισαγωγή.....	47
Βασικές Εξισώσεις.....	47
Αλγόριθμος επίλυσης του κώδικα PTC.....	48
4.2 Υπόγεια τρισδιάστατη ροή.....	48
Βασική εξίσωση.....	48
Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	49
Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.....	51
Το κάθετο παράγωγο.....	51
Παράγωγος του χρόνου.....	53
4.3 Οριακές συνθήκες.....	54
Καθορισμένο υδραυλικό ύψος.....	54
Καθορισμένη ροή.....	54
Τρίτου τύπου.....	55
4.4 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα.....	55
4.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων.....	57
Βασικές εξισώσεις.....	57
5. Περιγραφή της περιοχής μελέτης	59
5.1 Γενικές πληροφορίες για το νομό Λασιθίου.....	59
5.2 Κλιματολογικά στοιχεία.....	61
Βροχοπτώσεις.....	63
Θερμοκρασία.....	63
Ανεμολογικά στοιχεία.....	64
5.3 Σεισμικότητα περιοχής.....	64
5.4 Χλωρίδα-Πανίδα - Φυτοκάλυψη περιοχής.....	65
5.5 Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	65
5.5.1 Διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων.....	66
6. Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης της Σητείας με τη χρήση του μοντέλου PTC	68
6.1 Εισαγωγή.....	68
6.2 Χάρτες.....	69
6.3 Οριακές συνθήκες.....	80
6.4 Υψόμετρο-Αρχικές συνθήκες.....	81
6.5 Βροχόπτωση.....	82

6.6 Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	84
6.7 Αρχική κατάσταση. Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα.....	85
6.8 Μελλοντικός προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρινσης με τη χρήση σεναρίων....	89
Σενάριο 1 ^ο	89
Σενάριο 2 ^ο	93
6.9 Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	96
Βιβλιογραφία	99
Παράρτημα	101

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη ροή των υπογείων υδάτων και το πρόβλημα της υπαλμύρινσης, της διείσδυσης δηλαδή του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα, το οποίο αντιμετωπίζουν κυρίως οι παράκτιες περιοχές. Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης μας είναι ο Δήμος Σητείας του νομού Λασιθίου για να διαπιστώσουμε εάν υπάρχει πρόβλημα και τέλος προτείνονται μέτρα αντιμετώπισης του φαινομένου μέσω των σεναρίων που εξετάζονται.

Η περιοχή είναι ιδιαίτερα τουριστική κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και για την κάλυψη των αναγκών υδροδότησης του νομού οι κάτοικοι προβαίνουν σε διάνοιξη γεωτρήσεων άντλησης και εκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποχώρηση της στάθμης του υδροφορέα και την διείσδυση της θάλασσας στην περιοχή. Με την εργασία αυτή εκτιμήθηκε το μέτωπο της υπαλμύρινσης στην παρούσα κατάσταση καθώς επίσης έγινε και μελλοντικός προσδιορισμός αυτού με τη χρήση σεναρίων.

Αρχικά έγινε μια σύντομη περιγραφή για τα είδη του υδροφορέα καθώς και για την κίνηση του υπόγειου ύδατος μέσα από θεμελιώδεις εξισώσεις. Στη συνέχεια εξετάστηκε το φαινόμενο της υπαλμύρινσης και οι τρόποι αντιμετώπισής του. Ακολούθησε περιγραφή των υπόγειων μοντέλων που προσομοιώνουν την κίνηση του υπόγειου ύδατος, από τα οποία χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο PTC. Περιγραφή του γίνεται στο Κεφάλαιο 4.

Η μελέτη του φαινομένου επικεντρώθηκε στην περιοχή γύρω από την πόλη της Σητείας, όπου ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των μορφολογικών, γεωλογικών και κλιματολογικών στοιχείων της. Τέλος παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που εισάγονται στο μοντέλο (οριακές συνθήκες, αρχικές συνθήκες, χάρτες, βροχόπτωση, υψόμετρο) και η βαθμονόμηση αυτού. Γίνεται παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης και η εξέταση σεναρίων για την βελτισίτη της. Εξετάστηκαν 2 σεναρία κατά τα οποία έγινε αύξηση και μείωση της παροχής των γεωτρήσεων κατά 25%.

Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Η εφαρμογή των σεναρίων μάλιστα είναι εφικτή, αλλά χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και σχεδιασμός για την αποφυγή επιδείνωσης του φαινομένου. Σε μια τέτοια περίπτωση η αναχαίτιση του μετώπου της υπαλμύρινσης είναι ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία.

1.Υπόγεια Υδραυλική

1.1Εισαγωγή

Στη φύση γίνεται διαχωρισμός του υπάρχοντος νερού σε επιφανειακό και υπόγειο. Επιφανειακό είναι το νερό των ποταμών και των λιμνών, ενώ υπόγειο είναι οι ποσότητες νερού που υπάρχουν στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η μελέτη των υπογείων υδάτων σχετίζεται άμεσα με τον Υδρολογικό κύκλο, καθώς η ανανέωση ενός μεγάλου μέρους του συνολικού όγκου των υπόγειων υδάτων γίνεται με τη διήθηση των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.



Σχήμα 1.1.Υδρολογικός κύκλος [πηγή: www.water.usgs.gov]

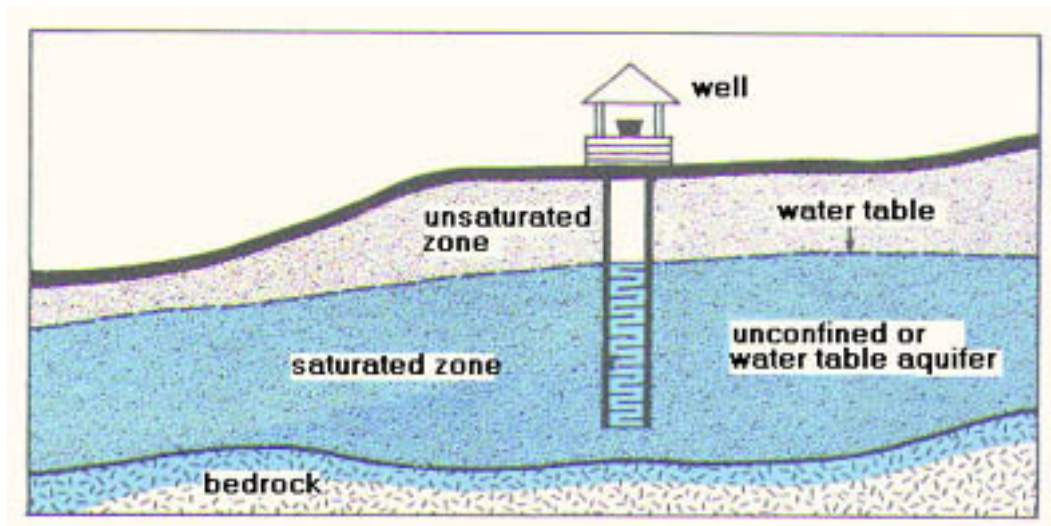
Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως διαπερατά. Αντίθετα υπάρχουν και τα αδιαπέραστα στρώματα, τα οποία ενώ έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν έστω και μικρές ποσότητες νερού, πρακτικά δεν έχουν καμία δυνατότητα μεταφοράς τους.

1.2 Υδροφορείς και Κατάταξή τους

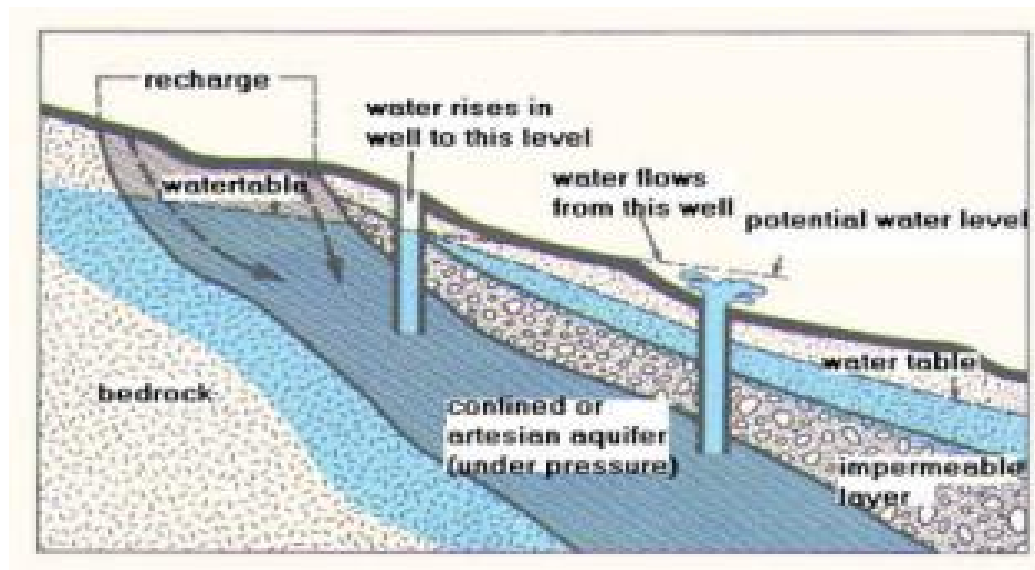
Μια γεωλογική μονάδα η οποία μπορεί να αποθηκεύσει μια αξιόλογη ποσότητα νερού και να τη μεταφέρει με ρυθμό υδρολογικά σημαντικό ονομάζεται υπόγειος υδροφορέας ή απλώς υδροφορέας. Ένας διακεκριμένος υδροφορέας έχει χαρακτηριστικά αποθήκευσης και μεταφοράς που μπορούν να θεωρηθούν σχετικά

ομοιόμορφα και η κίνηση του νερού σε αυτόν μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο ροής που προκαλείται από ένα πεδίο δυναμικής ενέργειας με απλή γεωμετρία.

Οι υδροφορείς ταξινομούνται με βάση τη φύση του άνω ορίου τους, σε δύο κύριες κατηγορίες: τους φρεάτιους και τους περιορισμένους, οι οποίοι φαίνονται παραστατικά στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 1.2 Ελεύθερος Υδροφορέας[πηγή: www.google.com]



Σχήμα 1.3 Περιορισμένος υδροφορέας[πηγή: www.google.com]

Πιο συγκεκριμένα, οι φρεάτιοι (ή ελεύθεροι) υδροφορείς είναι εκείνοι, στους οποίους το άνω όριο είναι ο φρεάτιος ορίζοντας. Κατά κανόνα το όριο αυτό είναι μεταβλητό στο χρόνο. Η τροφοδοσία των φρεάτιων υδροφορέων γίνεται από το νερό που

δηθείται άμεσα από το υπερκείμενο έδαφος ή από γειτονικά επιφανειακά ύδατινα σώματα, κινούμενο κατακόρυφα υπό την επίδραση της βαρύτητας.

Οι περιορισμένοι (ή υπό πίεση) υδροφορείς είναι εκείνοι των οποίων τα άνω και κάτω όρια ορίζονται από γεωλογικούς σχηματισμούς πρακτικά αδιαπέρατους. Τα όρια των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερά στο χρόνο. Η τροφοδοσία τους με νερό γίνεται συνήθως από μια περιοχή τους που έρχεται σε επαφή με το έδαφος χωρίς να μεσολαβεί αδιαπέρατο στρώμα. Προφανώς η πίεση στο άνω όριο των περιορισμένων υδροφορέων δεν είναι ίση με την ατμοσφαιρική αλλά μεγαλύτερη. Σε περίπτωση που η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ο υδροφορέας ονομάζεται αρτεσιανός.

Ασφαλώς οι παραπάνω δύο τύποι υδροφορέων αποτελούν ιδεατές καταστάσεις. Στην πραγματικότητα μπορεί ένας υδροφορέας να εμφανίζει κατά περιοχές χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών. Εξ' άλλου τα όρια των υδροφορέων της μιας ή της άλλης κατηγορίας μπορεί να μην είναι αδιαπέρατα (είτε επειδή το σε επαφή γεωλογικό στρώμα έχει μη μηδενική διαπερατότητα, είτε λόγω τοπικών διαρροών σε ρήγματα κτλ.), οπότε μιλάμε για φρεάτιους υδροφορείς με διαρροή και περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή. [πηγή: Γεώργιος Χ. Σούλιος, Γενική Υδρογεωλογία]

1.3 Παράμετροι Υδροφορέων

Οι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από την ικανότητα που έχουν να συγκρατούν το νερό ή να του επιτρέπουν να μετακινείται μέσα από αυτούς. Οι ιδιότητες που τους χαρακτηρίζουν είναι:

- Το *ογκομετρικό πορώδες* ή απλά πορώδες (porosity), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακένων (V_v) προς το συνολικό όγκο (V_T) του πορώδους μέσου:

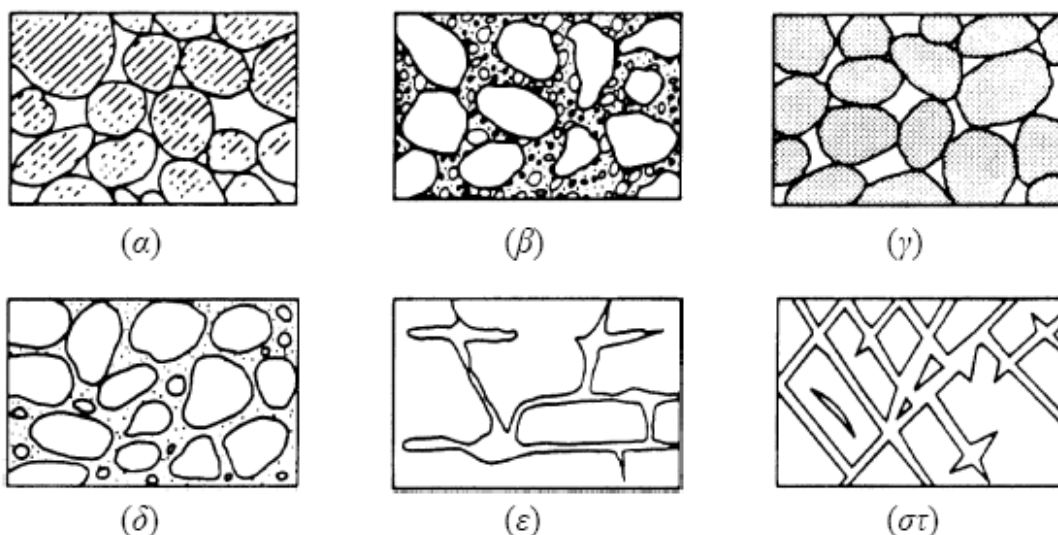
$$\text{Πορώδες: } n = V_v / V_T$$

Όπου V_v : ο όγκος των διακένων

V_T : ο συνολικός όγκος του πορώδους μέσου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

1. Η κοκκομετρική σύνθεση.
2. Η διάταξη των κόκκων.
3. Το σχήμα των κόκκων.



Σχήμα 1.4 Διάφοροι τύποι διάταξης κόκκων και διακένων σε πορώδη μέσα. (α) Καλά διαβαθμισμένη ιζηματογενής απόθεση με μεγάλο πορώδες· (β) ελάχιστα διαβαθμισμένη ιζηματογενής απόθεση με χαμηλό πορώδες· (γ) καλά διαβαθμισμένη ιζηματογενής απόθεση που αποτελείται από πορώδεις κόκκους, με υψηλό συνολικό πορώδες· (δ) καλά διαβαθμισμένη ιζηματογενής απόθεση με χαμηλό πορώδες λόγω της πλήρωσης των διακένων από ορυκτά υλικά· (ε) πέτρωμα που απέκτησε πορώδες μετά από χημική διάλυση· (στ) πέτρωμα που απέκτησε πορώδες μετά από ρηγμάτωση (πηγή: Meinzer, 1923).

- Το ενεργό πορώδες (effective porosity) ή ειδική απόδοση, το οποίο είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό i των πόρων δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

$$n_e = V_v / V_T$$

όπου V_v : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.

V_T : ο συνολικός όγκος του πορώδους μέσου.

Παρατήρηση: Τα ιζηματογενή πετρώματα δεν έχουν διακυμάνσεις στις τιμές του πορώδους n και του ενεργού πορώδους n_e , σε αντίθεση με τα αργιλώδη εδάφη που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.

- Η ειδική συγκράτηση, η οποία αναφέρεται στο S_r όπου:

$$S_r = n - n_e$$

- Τη μηχανική Ταξινόμηση εδαφών σύμφωνα με το American Society of Testing Materials.

Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Υλικά	Πορώδες (%)	Ειδική απόδοση (%)
<i>Μη διαστρωματοποιημένα υλικά</i>		
Χαλίκια	25-35	15-30
Άμμος	25-45	10-30
Ιλύς	35-50	5-10
Πηλός	45-55	1-5
Άμμος και Χαλίκια	20-30	10-20
<i>Διαστρωματοποιημένα υλικά</i>		
Αμμόλιθος	5-30	3-15
Δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι	1-20	0,5-10
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5-30	2-15
Σχιστόλιθος	1-10	0,5-5
Κυστοειδής Βασάλτης	10-40	5-15
Αποσαθρωμένος βασάλτης	5-30	2-10
Πορώδης βράχος	10-60	5-20
Φρέσκος γρανίτης και γνευσίτης	0,01-2	<0,1
Αποσαθρωμένος γρανίτης και γνευσίτης	1-15	0,5-5

Πηγή: Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980; Driscoll, 1986

1.4 Βασικές αρχές της υπόγειας ροής

Νόμος του Darcy

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των «σωλήνων» μιας υπόγειας ροής σε συνδυασμό με τις πολύ μικρές ταχύτητες ροής οδηγούν κατά κανόνα σε πλήρη υπεροχή των δυνάμεων συνεκτικότητας έναντι των δυνάμεων αδρανείας, δηλαδή σε στρωτή διάταξη ροής. Το σχετικό μέγεθος των δυνάμεων αδρανείας έναντι των δυνάμεων συνεκτικότητας δίνει ο χαρακτηριστικός (αδιάστατος) αριθμός Reynolds: $R=(q d)/\nu$, όπου q η παροχή ανά μονάδα γεωμετρικής επιφάνειας κάθετης στη ροή, d η μέση διάμετρος εδαφικών κόκκων, και ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού. Πειράματα έδειξαν ότι σε κοκκώδη εδάφη η διάταξη είναι στρωτή, εφόσον ο αριθμός R

έχει τιμές μικρότερες της μονάδας, ενώ οι αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές για τιμές του R που δεν ξεπερνούν το 10.

Είναι όμως φανερό ότι το πολύπλοκο σχήμα των «σωλήνων» μιας υπόγειας ροής και, γενικότερα η χαοτική γεωμετρία του δικτύου των πόρων, δεν επιτρέπει την ακριβή μαθηματική αναπαράσταση της ροής στην πραγματική μικροσκοπική κλίμακά της. Για το λόγο αυτό επιχειρήθηκε η μακροσκοπική θεώρηση των αντιστάσεων του πορώδους μέσου (ως συνόλου) στη ροή, σε αντιστοιχία με το πρόβλημα των συνολικών απωλειών φορτίου σε αγωγούς συναρτήσει των μακροσκοπικών γεωμετρικών δεδομένων (υγρής διατομής, υδραυλικής ακτίνας) και υδραυλικών δεδομένων (μέσης ταχύτητας).

Τη μακροσκοπική λύση έδωσε πρώτος ο Darcy το 1854, μετά από πειραματική μελέτη κατά την οποία μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή είναι ο **νόμος του Darcy** και η μαθηματική έκφραση είναι:

$$Q/A = -K (\Delta h/L) \Rightarrow q = -K(\Delta h/L)$$

Όπου: Q είναι η παροχή (L^3/T)

A είναι η επιφάνεια (L^2)

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

Δh είναι η απώλεια φορτίου (L)

L είναι το μήκος της στήλης (L)

q είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Η έκφραση $\Delta h/L$ συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως $\Delta h/\Delta L$ και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds < 1 , έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για $Re=10$. Στην περίπτωση των υπόγειων νερών η ροή συμβαίνει με $Re < 1$, πράγμα το οποίο εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου Darcy χωρίς καμιά προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροή.

Η ταχύτητα του Darcy θεωρεί εξ' ορισμού ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Στην πραγματικότητα όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$$

Όπου q_p είναι η ταχύτητα διήθησης (L/T)

Q είναι ο ρυθμός παροχής (L³/T)

A είναι η επιφάνεια (L²)

n είναι το πορώδες

q είναι η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

dh είναι η απώλεια φορτίου (L)

dl είναι το μήκος της στήλης (L)

Υδραυλική αγωγιμότητα:

Ο ορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας K γίνεται μέσω του νόμου του Darcy. Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για το νερό που κινείται σε διάφορα γεωλογικά μέσα δίνονται στον επόμενο πίνακα. Επισημαίνεται το κατά πολλές τάξεις μεγέθους εύρος διακύμανσης της τιμής του K στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαρτάται τόσο από το ρευστό, όσο και από το πορώδες μέσο. Η ανάγκη διαχωρισμού της επίδρασης των ιδιοτήτων του ρευστού από τις ιδιότητες του μέσου, οδήγησε τον Boussinesq (το 1920) στη χρησιμοποίηση ενός άλλου μεγέθους, της διαπερατότητας (k) η οποία ορίζεται από την εξίσωση:

$$k = K \frac{\nu}{g}$$

όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η διαπερατότητα είναι ιδιότητα μόνο του μέσου.

Σε ανισότροπους υδροφορείς η περιγραφή της υδραυλικής αγωγιμότητας απαιτεί τρεις τουλάχιστον παραμέτρους, τις υδραυλικές αγωγιμότητες στις τρεις κύριες διευθύνσεις. Σε ετερογενείς υδροφορείς, που στην πραγματικότητα αποτελούν τον κανόνα, η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει από θέση σε θέση. Ωστόσο, πολύ συχνά χρησιμοποιείται η ιδιότητα της ομοιογένειας ως μια απλουστευτική προσέγγιση, η

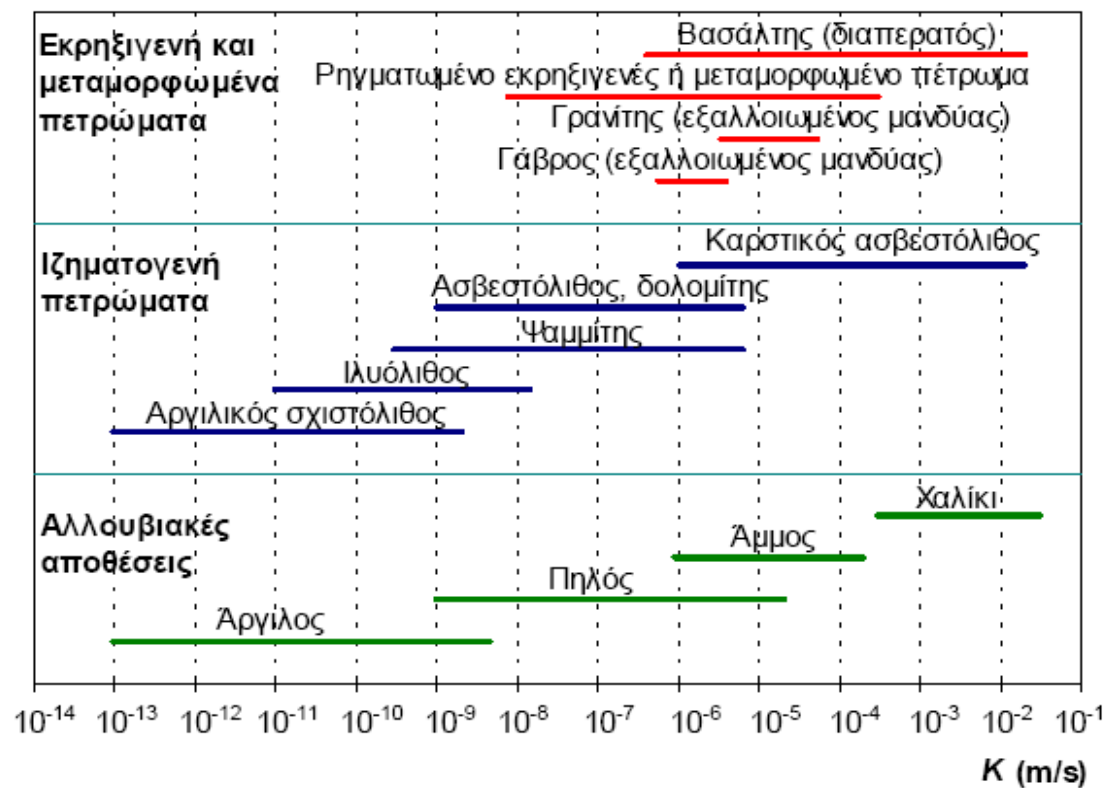
οποία γενικά είναι επαρκής για μια συγκεκριμένη, κατά περίπτωση, χωρική κλίμακα. Έτσι, για μια περιοχή με μέγεθος που καθορίζεται από αυτή τη χωρική κλίμακα, χρησιμοποιείται μια ενιαία μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία είναι γνωστή ως αντιπροσωπευτική υδραυλική αγωγιμότητα.

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας φαίνονται παρακάτω:

Τύπος εδάφους	Υδραυλική Αγωγιμότητα, K (cm/s)
Άργιλος	10^{-9} - 10^{-6}
Ιλύς	10^{-7} - 10^{-3}
Άμμος	10^{-5} - 10^{-1}
Χαλίκι	10^{-1} - 10^{-2}

Πηγή: Freeze and Cherry, 1979

Επίσης μια πιο γενική εικόνα για τις διακυμάνσεις της Υδραυλικής Αγωγιμότητας μπορούμε να έχουμε από το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 1.5 Διαστήματα μεταβολής της Υδραυλικής Αγωγιμότητας για διάφορα γεωλογικά μέσα (με βάση στοιχεία των Domenico και Schwartz, 1990).

Σε περίπτωση οριζόντιας μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής σε ένα ομογενές και ισότροπο στρώμα με δεδομένο πάχος b , χρησιμοποιείται πολύ συχνά μια παράγωγη παράμετρος, η μεταφορικότητα T , η οποία ορίζεται από την εξίσωση:

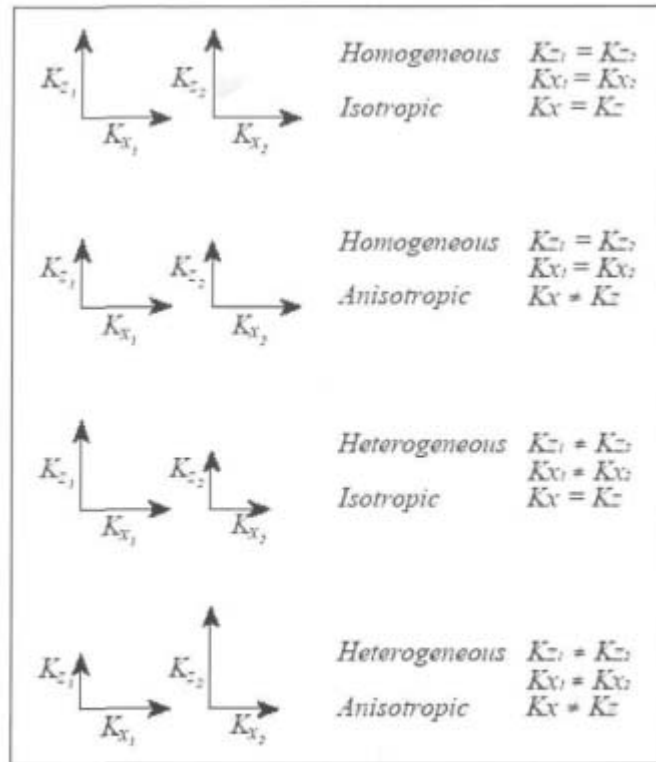
$$T = K b$$

Διευκρινίζεται ότι η παράμετρος αυτή δεν έχει νόημα για πιο σύνθετες ροές σε τρεις διαστάσεις.

Ομοιογένεια και ισοτροπία

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται, όπως προαναφέραμε, από σημείο σε σημείο. Επίσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ιδιότητα της *ομοιογένειας* ή *ετερογένειας* και στη δεύτερη περίπτωση την ιδιότητα της *ισοτροπίας* ή *ανισοτροπίας*.

- Ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως **ομοιογενής** όταν έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- Ως **ετερογενής** χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.
- **Ισότροπος** χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Αντίθετα, **ανισότροπος** χαρακτηρίζεται αυτός με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.



Πηγή: Freeze and Cherry, 1979

Σχήμα 1.6 Γραφική αναπαράσταση των εννοιών της Ομοιογένειας-Ανομοιογένειας και Ισοτροπίας-Ανισοτροπίας.

1.5 Γενική μορφή του Νόμου του Darcy.

Εξαιτίας λοιπόν του φαινομένου της ανισοτροπίας, κατά την περίπτωση εφαρμογής του νόμου του Darcy, η ταχύτητα της υπόγειας ροής θεωρείται ως διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες και στις τρεις κατευθύνσεις x, y και z.

$$\rightarrow \text{Στην διεύθυνση -x: } q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\rightarrow \text{Στην διεύθυνση -y: } q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\rightarrow \text{Στην διεύθυνση -z: } q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο νόμος του Darcy εμφανίζεται στη γενική του μορφή:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

2. Το φαινόμενο της Υφαλμύρινης

2.1 Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων νερών των παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Η εισροή αυτή μπορεί να είναι μόνιμη ή συνηθέστερα μη μόνιμη ροή. Έτσι το αλμυρό νερό αντικαθιστά ίσες ποσότητες γλυκού νερού. Αποτέλεσμα της διείσδυσης αυτής της θάλασσας είναι η υφαλμύριση των υδροφορέων αυτών.

Με τον όρο «υφαλμύριση υπόγειων υδάτων» εννοείται ύπαρξη όχι μόνο γλυκού αλλά και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς αυτούς. Αιτία ύπαρξης της υφαλμύρισης μπορεί να είναι γεωλογικοί παράγοντες, συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται κατά τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς παράγοντες (π.χ. ανύψωση της στάθμης της θάλασσας), όσο και σε ανθρωπογενείς (υπεραντλήσεις) ή πολλές φορές συνδυασμό και των δύο. Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και αφορά συγκεκριμένους υδροφορείς, με γνωστά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Όταν ο ρυθμός άντλησης σε φρέατα κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε θαλάσσιο νερό εισρέει στους υδροφορείς, καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Πρέπει να τονιστεί ότι το φαινόμενο δε μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο, γι' αυτό η αντιμετώπισή του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στις περισσότερες περιπτώσεις αναγνωρίζεται από τους υπεύθυνους υδρογεωλόγους και μηχανικούς. Συνήθως όμως είναι άγνωστη η έκτασή του, λόγω έλλειψης στοιχείων. Δεν είναι δηλαδή εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Κατά την εισροή θάλασσας σε έναν υδροφορέα, οι συνθήκες μόνιμης ροής δεν αποκαθίστανται εύκολα. Επιπλέον, τις περισσότερες φορές το πρόβλημα φτάνει σε ανεπίτρεπτα όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν λαμβάνονται εγκαίρως. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών είναι συνήθως συνδεδεμένη με οικονομικούς, κοινωνικούς, νομικούς και πολιτικούς παράγοντες πράγμα που δυσχεραίνει ιδιαίτερα το πρόβλημα.

Προβλήματα υφαλμύρινσης παρατηρούνται σε μεγάλη-περιφερειακή ή μικρή-τοπική κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως π.χ. από εγγειοβελτιωτικά έργα. Λέγοντας μικρής κλίμακας προβλήματα, εννοείται η επίδραση που παρατηρείται στη διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού στην περιοχή γύρω και κάτω από το φρέαρ άντλησης (upcoming).

Τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα σύνθετα και δεν είναι απλός ο τρόπος προσέγγισής τους. Μια τεχνική η οποία ακολουθείται, είναι η εφαρμογή κατά τη διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης. Επομένως για την αντιμετώπισή τους απαιτούνται αφενός εξειδικευμένες γνώσεις ενός ιδιαίτερα δυσχερούς φαινομένου, όπως είναι η υφαλμύριση, και αφετέρου δυνατότητα χρήσης μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων και προσαρμογής των τεχνικών αυτών στις απαιτήσεις του υπό εξέταση προβλήματος.

Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για τον μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφορέων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες επίσης στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υδροφορέα μετά από μετρήσεις πεδίου.

Βασική προϋπόθεση όμως για τα παραπάνω είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μαθηματική προσομοίωση και την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου υπολογιστικού προγράμματος να είναι «σωστά», δηλαδή να αντιπροσωπεύουν πράγματι τον υπό μελέτη υδροφορέα. Η εκπόνηση συνεπώς αξιόπιστων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων είναι αναγκαία.

Ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμοσμένες μαθηματικές προσομοιώσεις έχουν οι μετρήσεις πεδίου, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο, επιτρέποντας τη βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύοντας για την επαλήθευσή του, αυξάνοντας συνεπώς την αξιοπιστία του. Σε συνδυασμό με την οικονομική δαπάνη που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, είναι αντιληπτή η σημασία που έχει ο σωστός σχεδιασμός τους. *[Α. Νάνου-Γιάνναρου, 2001]*

2.2 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού.

Δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων:

- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς
- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα.

Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους

Η διεύθυνση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά. Επομένως, έχουμε να κάνουμε με πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση c εξαρτώμενη από την πυκνότητα ρ (για κορεσμένη ροή). Οι άγνωστοι του προβλήματος στις διάφορες θέσεις r του πεδίου ροής και για διάφορους χρόνους t , είναι: συγκέντρωση $c(r,t)$, ταχύτητα $V(r,t)$, πίεση $p(r,t)$, πυκνότητα $\rho(r,t)$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- >> Εξίσωση διατήρησης μάζας
- >> Εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς
- >> Εξισώσεις κίνησης (νόμος Darcy)
- >> $\rho = \rho(c)$ (συνήθως γραμμική σχέση)

Απότομη διεπιφάνεια

- Περίπτωση 1^η: Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρούνται:

- >> κατάσταση ισορροπίας, μόνιμη ροή
- >> ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν.

- Περίπτωση 2^η: Λόγω άντλησης θεωρούνται:

- >> κινούμενη διεπιφάνεια, μη μόνιμη ροή.

- Υπό προϋποθέσεις γίνεται παραδοχή της οριζόντιας ροής.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Εξισώσεις για το γλυκό νερό
 - >> Εξίσωση συνέχειας
 - >> Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)
- Εξισώσεις για το θαλάσσιο νερό
 - >> Εξίσωση συνέχειας

>> Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Άγνωστοι του προβλήματος είναι η πίεση p , το βάθος ζ της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας και οι ταχύτητες V για το γλυκό και θαλάσσιο νερό.

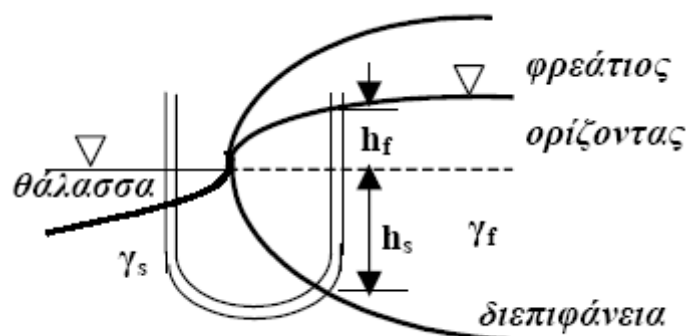
2.3 Αναλυτικές σχέσεις

Λόγω των απλοποιημένων φυσικών παραδοχών και της γεωμετρίας, οι αναλυτικές λύσεις δεν μπορούν να επιλύσουν πραγματικά προβλήματα. Εν τούτοις είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο και απαραίτητο εργαλείο σε πολλές περιπτώσεις:

- Για εκπαιδευτικούς σκοπούς οι αναλυτικές σχέσεις επιτρέπουν την καλύτερη φυσική κατανόηση του προβλήματος.
- Στις μελέτες σκοπιμότητας οι αναλυτικές σχέσεις αποτελούν πολλές φορές ένα πρώτο εργαλείο. Τα πιο πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα απαιτούν υδρολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία που ή δεν διατίθενται ή δεν υπάρχουν σ' αυτή την αρχική φάση.
- Ένα μαθηματικό μοντέλο χρειάζεται αξιόπιστα εισαγωγικά στοιχεία, για να εξάγει ορθά αποτελέσματα. Σκόπιμο είναι πριν από μια σημαντική ή μεγάλης κλίμακας έρευνα, η πραγματοποίηση στοιχειωδών υπολογισμών και η εξαγωγή πρώτων συμπερασμάτων.
- Τέλος, αναλυτικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την επαλήθευση μαθηματικών μοντέλων. [Α. Νάνου-Γιάνναρου, 2001]

2.4 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Περισσότερο από έναν αιώνα πριν, οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901) ανεξάρτητα, βρήκαν ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας.



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben-Herzberg

Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα *Ghyben-Herzberg*, προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit. Ορίζοντας h_f το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και γ_f , γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και δ το λόγο $\gamma_f/(\gamma_s - \gamma_f)$, ισχύει:

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f$$

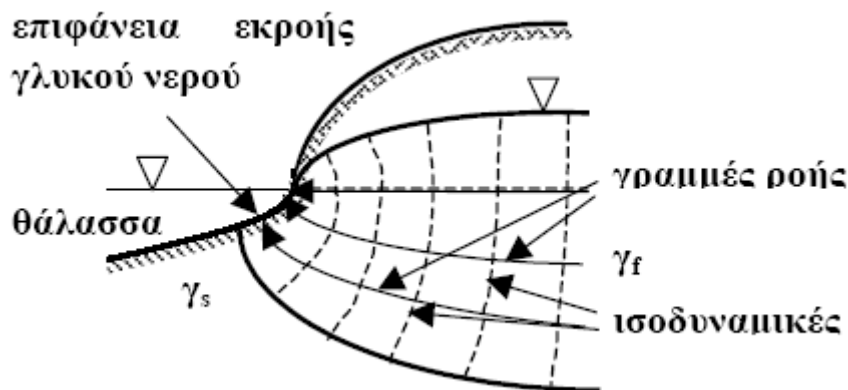
Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Για $\rho_f = 1,000 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$, υπολογίζεται ότι: $\mathbf{h_s = 40h_f}$.

Η χρήση της εξίσωσης *Ghyben-Herzberg* επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, ως εξής:

- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό.
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την προαναφερθείσα εξίσωση, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή.
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα.

- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί τον πόδα της αλάτινης σφήνας.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για περιορισμένους και φρεάτιους υδροφορείς.

2.5 Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας

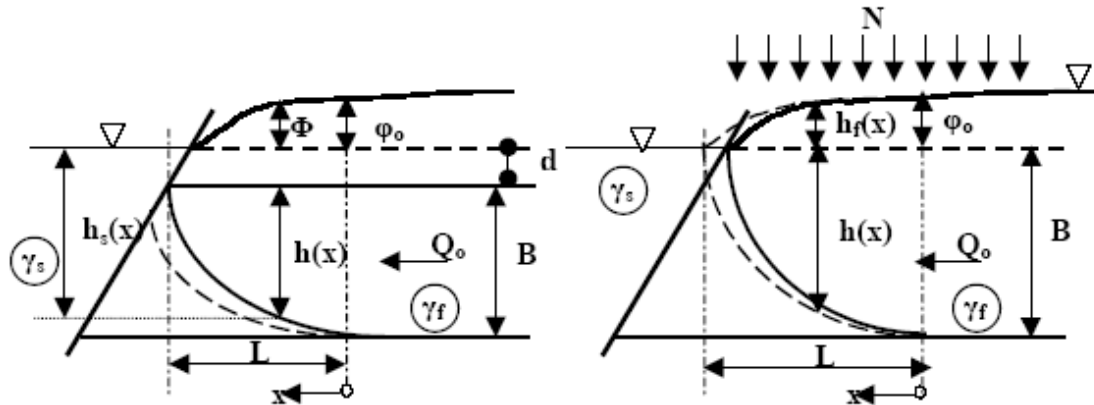


Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση πραγματικής διεπιφάνειας

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η προσέγγιση *Ghyben-Herzberg* δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- Η προσέγγιση *Ghyben-Herzberg* δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεάτιων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης.

2.6 Ακίνητη διεπιφάνεια σε κατακόρυφο επίπεδο

Ένας απλός τρόπος υπολογισμού της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, χωρίς την παρουσία φρεάτων, είναι με τη βοήθεια της μονοδιάστατης ανάλυσης. Τα αποτελέσματα επιτρέπουν την ποιοτική μελέτη του φαινομένου. Οι παραδοχές που ισχύουν είναι: μόνιμη ροή γλυκού νερού, ακίνητη στρώση θαλάσσιου νερού, ομογενής υδροφορέας με υδραυλική αγωγιμότητα K , οριζόντια ροή και προσέγγιση *Ghyben-Herzberg*. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια.



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση (α)Περιορισμένου και (β) Ελεύθερου Υδροφορέα

2.6.1 Περιορισμένος υδροφορέας

Εφόσον το αλμυρό νερό είναι ακίνητο, οι εξισώσεις της ροής γράφονται μόνο για το γλυκό νερό. Θέτοντας Q_o την παροχή γλυκού νερού προς τη θάλασσα, η εξίσωση συνέχειας σε συνδυασμό με το νόμο του Darcy, γράφεται:

$$Q_o = \text{const.} = -K_f \cdot h(x) \cdot \frac{\partial \phi(x)}{\partial x}$$

$$K \equiv K_f = \frac{k\gamma_f}{\mu_f}, \quad \phi \equiv \phi_f$$

Σύμφωνα με την προσέγγιση *Ghyben-Herzberg* είναι:

$$h_s = d + h(x) = \delta \cdot \phi(x) \quad , \quad \delta \phi_o = d + B$$

Επομένως:

$$Q_o = -\frac{Kh}{\delta} \cdot \frac{dh}{dx} = -K \cdot [\delta \phi - d] \cdot \frac{d\phi}{dx}$$

Ολοκληρώνοντας από την αρχή της αλάτινης σφήνας $x=0$, $\phi=\phi_o$, $h=B$ μέχρι την τυχαία θέση x , ϕ , h προκύπτουν οι εξής εύχρηστες σχέσεις:

$$Q_o x = K[B^2 - h^2(x)]/2\delta$$

$$Q_o x = \frac{K\delta}{2}(\phi_o^2 - \phi^2) - Kd(\phi_o - \phi)$$

Στον πόδα της αλάτινης σφήνας, δηλαδή για $x=L$, $h=0$, $\phi=d/2$, υπολογίζονται:

$$Q_o L = \frac{K\phi_o}{2}(\delta\phi_o - 2d) + \frac{Kd^2}{2\delta} = \frac{K}{2\delta}B^2$$

Η παραπάνω σχέση συσχετίζει τη παροχή γλυκού νερού από τον υδροφορέα με το πάχος του και το μήκος της αλάτινης σφήνας. Επομένως για γνωστή παροχή Q_o , υπολογίζεται το μήκος L και αντίστροφα.

Μεγάλη σημασία έχει το μέγεθος ϕ_o , δηλαδή το πιεζομετρικό φορτίο ως προς τη στάθμη της θάλασσας στον πόδα της σφήνας. Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού θα εισρεύσει προς το εσωτερικό του υδροφορέα μέχρι την τιμή ϕ_o . Άρα όσο πιο κοντά στην εκροή προς τη θάλασσα είναι το ϕ_o , τόσο μικρότερο είναι το μήκος της αλάτινης σφήνας. Στην παρατήρηση αυτή για το ϕ_o , βασίζονται διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος της υφαλμύρινης.

2.6.2 Φρεάτιος υδροφορέας

Αντίστοιχη ανάλυση μπορεί να γίνει και για τους φρεάτιους υδροφορείς, λαμβάνοντας επιπλέον υπ' όψιν την κατακόρυφη διήθηση $N=\sigma\alpha\theta$. ή $N=N(x)$. Και πάλι ισχύει η προσέγγιση *Ghyben-Herzberg*: $h(x)=\delta h_f(x)$.

Η εξίσωση συνέχειας είναι:

$$Q_o + Nx = -K(h + h_f) \frac{\partial h_f}{\partial x} = -K(1 + \delta)h_f \frac{\partial h_f}{\partial x}$$

Ολοκληρώνοντας από την αρχή της αλάτινης σφήνας $x=0$, $h_f=\phi_o$, $h=B$ μέχρι την τυχαία θέση x , προκύπτει:

$$\phi_o^2 - h_f^2 = \frac{2Q_o x + Nx^2}{K(1 + \delta)}$$

Στον πόδα της σφήνας ισχύει η σχέση:

$$\phi_o^2 = \frac{2Q_o L + NL^2}{K(1 + \delta)} \quad \text{ή} \quad Q_o = \frac{KB^2}{2L} \frac{(1 + \delta)}{\delta^2} - \frac{NL}{2}, \quad \phi_o = \frac{B}{\delta}$$

Για την περίπτωση μηδενικής κατακόρυφης διήθησης στον υδροφορέα, η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$\phi_o^2 = \frac{2Q_o L}{K(1 + \delta)} = \frac{B^2}{\delta^2}$$

Ειδικά για τον φρεάτιο υδροφορέα, αποδεικνύεται ότι η εκμετάλλευση, τουλάχιστον θεωρητικά, των βροχοπτώσεων μπορεί να επιτρέψει τον μηδενισμό της εκροής Q_0 γλυκού νερού στη θάλασσα:

$$L = \frac{B}{\delta} \left[\frac{K(1+\delta)}{N} \right]^{1/2}$$

Στην περίπτωση παράκτιου υδροφορέα και φρέατος ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται η αναλυτική λύση του Strack, η οποία επιλύει παράλληλα και την περιοχή που υπάρχει η αλάτινη σφήνα και την περιοχή γλυκού νερού στην οποία δεν έχει ακόμη διεισδύσει το αλμυρό νερό. Χρησιμοποιείται και πάλι η προσέγγιση *Ghyben-Herzberg*, η ροή θεωρείται μόνιμη και ο υδροφορέας θεωρείται οριζόντιος, ομογενής και ισότροπος.

2.7 Υπολογιστικές μέθοδοι

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετά υπολογιστικά σχήματα που βοηθούν στη μαθηματική προσομοίωση της υφαλμύρινσης υπόγειων υδροφορέων. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν την παραδοχή της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και επιλύουν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς ενώ κάποια λαμβάνουν υπόψη θερμοκρασιακές διαφορές. Τα πιο γνωστά είναι τα : SUTRA, SHARP, FEFLOW, SWIP, MOCDENSE και HST3D. Επειδή το πρόβλημα της υφαλμύρινσης είναι ιδιαίτερα σύνθετο, απαιτείται προσοχή όχι μόνο στην επιλογή ενός μοντέλου, αλλά και στην επαλήθευση και βαθμονόμησή του με δεδομένα πεδίου.

2.8 Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρινσης

Το θαλασσινό νερό περιέχει υψηλή συγκέντρωση αλατιού, επομένως κι ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού να αναμειχθεί με γλυκό νερό ενός υδροφορέα, μπορεί να προκαλέσει υφαλμύριση των νερών του. Αν αρχίσει η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς έναν υδροφορέα τότε το φαινόμενο είναι δυνατόν να διαρκέσει πολλά χρόνια και μάλιστα είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Για τον έλεγχο της υφαλμύρινσης έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι, ορισμένες από τις οποίες είναι:

- Έλεγχος της άντλησης. Αν η άντληση από έναν παράκτιο υδροφορέα μειωθεί ή μετατοπιστεί η θέση του πηγαδιού, τότε η στάθμη του υδροφορέα είναι δυνατόν να αυξηθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα κι έτσι το φαινόμενο της υφαλμύρινσης να περιοριστεί εν μέρει.

- Τεχνητή αναπλήρωση. Η υφαλμύριση μπορεί να περιοριστεί με την τεχνητή αναπλήρωση από φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα ύδατα ή από πηγάδια εμπλουτισμού. Μ'αυτόν τον τρόπο αυξάνονται τα επίπεδα του υπόγειου υδροφορέα και ουσιαστικά λειτουργούν σαν ένα φράγμα που εμποδίζει τη θαλάσσια εισχώρηση.
- Συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού. Η συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού στα παράκτια συστήματα είναι καθοριστικής σημασίας καθώς έτσι προλαμβάνεται η θαλάσσια διείσδυση. Η συντήρηση αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την αποφυγή άντλησης του υδροφορέα κατά μήκος της ακτής.
- Ανάπτυξη υποθαλάσσιων φραγμών. Κατασκευάζοντας ένα αδιαπέραστο υποθαλάσσιο φράγμα κατά μήκος της ακτής είναι δυνατόν το φαινόμενο να προληφθεί ή ακόμη και να περιοριστεί. Ωστόσο μ' αυτή τη μέθοδο πρέπει να υπολογιστεί και τυχόν διαρροή που οφείλεται στη διαβρωτική επίδραση της θάλασσας ή σε κάποιο σεισμό.
- Κατασκευάζοντας πηγάδια με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με επιφανειακές λεκάνες διήθησης.
- Άντληση θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρισης έτσι ώστε να μειωθεί η εξάπλωση του φαινομένου.
- Η τεχνική της «κρυσταλλοποίησης», η οποία είναι η δημιουργία κρυστάλλων μεγάλου μεγέθους μεταξύ των κόκκων των πορωδών, όπου ουσιαστικά λειτουργούν ως ασπίδα για την υφαλμύριση αφού μειώνουν την υδροπερατότητα των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων.

Συγκεκριμένα για τον ελληνικό χώρο έχει γίνει χαρτογράφηση των περιοχών οι οποίες αντιμετωπίζουν πιθανό πρόβλημα υφαλμύρισης λόγω υπεράντλησης του υπόγειου υδροφορέα. Αυτές φαίνονται παραστατικά στον ακόλουθο χάρτη:



Σχήμα 2.4 Χάρτης απεικόνισης περιοχών με επικινδυνότητα θαλάσσιας διείσδυσης λόγω υπεράντλησης.

[Πηγή Κεφαλαίου: Α. Νάνου-Γιάνναρου, Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων, Συμπόσιο «ΑΙΓΑΙΟ- ΝΕΡΟ-ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

3. Μοντελοποίηση κίνησης υπογείων υδάτων

3.1 Εισαγωγή

Πολύ συχνά μηχανικοί και υδρογεωλόγοι καλούνται να προβλέψουν τη συμπεριφορά συστημάτων ροής υπογείων υδάτων. Όμως η γνώση και η εμπειρία τους μόνο δεν αρκούν για την αξιόπιστη ανάλυση αυτών των πολύπλοκων συστημάτων υπόγειας ροής. Το βέλτιστο και πιο αξιόπιστο εργαλείο για τις αναλύσεις του είναι ένα *μοντέλο ροής υπογείων υδάτων*.

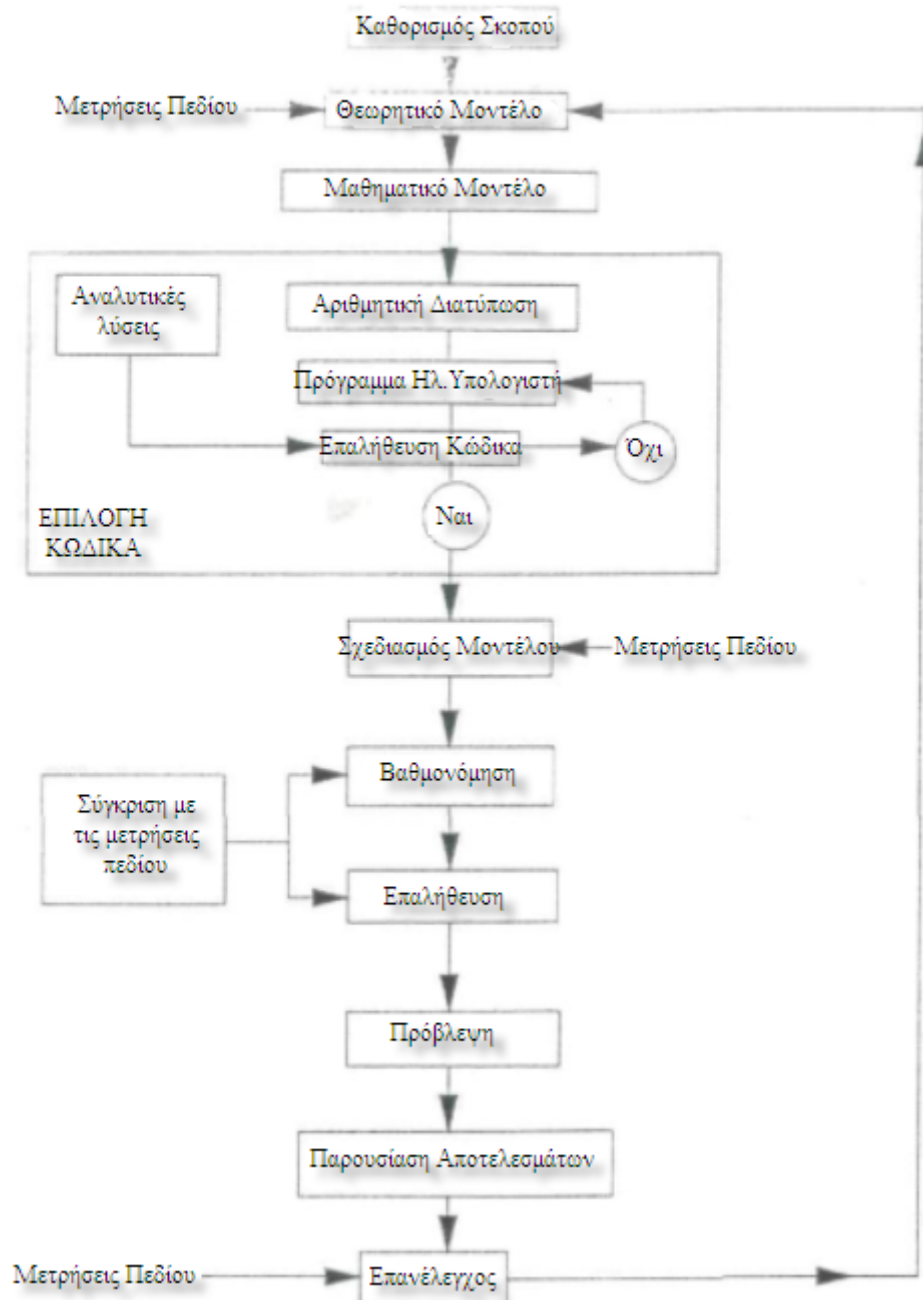
Με τον όρο «*μοντέλο*» καλούμε οποιοδήποτε εργαλείο αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση την κατάσταση που επικρατεί στο πεδίο. Ένα μοντέλο μπορεί να είναι *φυσικό* ή *μαθηματικό*. Το φυσικό μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή άμεσα σε αντίθεση με το μαθηματικό μοντέλο όπου έχουμε έμμεση προσομοίωση της υπόγειας ροής. Στην περίπτωση του μαθηματικού μοντέλου έχουμε τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο σύστημα, σε συνδυασμό με άλλες εξισώσεις που περιγράφουν τα υδραυλικά ύψη ή τις παροχές κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο, οι εξισώσεις που περιγράφουν την αρχική κατάσταση για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι εξίσου απαραίτητες (αρχικές συνθήκες). Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου μπορεί να γίνει είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά και στις δύο περιπτώσεις όμως είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η αριθμητική μέθοδος συγκεκριμένα προτιμάται σε περιπτώσεις περίπλοκων προβλημάτων και γενικά, όσο λιγότερες είναι οι απλουστευτικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι αυτό.

Η μοντελοποίηση βρίσκει διάφορες εφαρμογές, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι η πρόβλεψη και η ερμηνεία.

3.2 Πρωτόκολλο μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση μπορεί να βοηθήσει πολύ στην οργάνωση και τη σύνθεση των δεδομένων του πεδίου. Τα βασικά βήματα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την υπόγεια ροή και την μεταφορά ρύπων είναι κατ' αρχήν η ανάπτυξη του μοντέλου και στη συνέχεια ακολουθούν κι άλλες διαδικασίες όπως η επιλογή του κώδικα του μοντέλου, η επαλήθευση, ο σχεδιασμός

του, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και η πρόβλεψη, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.1 Βασικά βήματα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου.

3.3 Βασικές εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι

Μια ολοκληρωμένη περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις θεμελιώδεις εξισώσεις σε περίπτωση που το μοντέλο εξαρτάται από το χρόνο. Πρωτού όμως εξαχθούν οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την περιγραφή της υπόγειας ροής, είναι απαραίτητο ένα θεμελιώδες μοντέλο του συστήματος. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής, σύμφωνα με τους Mary P. Anderson και William W. Woessner (1992):

1. Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).
2. Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint).

1. Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην ιδέα του περιορισμένου (confined) και μη περιορισμένου-ελεύθερου (unconfined) υδροφορέα. Ο υδροφορέας είναι μια μονάδα πορώδους υλικού ικανή να αποθηκεύει και να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες νερού στα πηγάδια. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής στα πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις περιλαμβάνοντας και αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Επίσης η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα από τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας.

Η προσέγγιση υδροφορέα χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει δυσδιάστατη και οριζόντια ροή τόσο για περιορισμένο όσο και για ελεύθερο υδροφορέα. Σε περίπτωση που έχουμε διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τρισδιάστατης ροής δια της οποίας η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από τον υδροφορέα. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέρατου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. Τα υδραυλικά ύψη στα αδιαπέρατα στρώματα δεν μας ενδιαφέρουν ουσιαστικά και γι' αυτό δεν υπολογίζονται κατά την προσομοίωση, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές χαράσσονται μόνο για τον περιορισμένο υδροφορέα.

Η γενική μορφή της μαθηματικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L$$

όπου

$$L = -K'_z \frac{h_{\pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma} - h}{b'}$$

Η εξίσωση αφορά περιορισμένο υδροφορέα και οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέλος αφορούν την οριζόντια ροή διαμέσου αυτού. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ερμηνεύονται ως εξής:

h το υδραυλικό ύψος

T_x, T_y οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στους άξονες x και y

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

R ένας όρος πηγής/δεξαμενής ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού

L η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος

K'_z η υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος

b' το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος

$h_{\pi\eta\gamma\gamma\acute{\eta}\varsigma}$ το υψόμετρο της πηγής

Η εφαρμογή της εξίσωσης σε ελεύθερο υδροφορέα ακολουθεί τις παραδοχές Dupuit, σύμφωνα με τις οποίες οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες, οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες και η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίδια με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας.

2.Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint)

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση δεν μας ενδιαφέρει άμεσα η αναγνώριση των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει κάθετη και οριζόντια ροή του συστήματος και επιτρέπει τη θεραπεία του σε δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι:

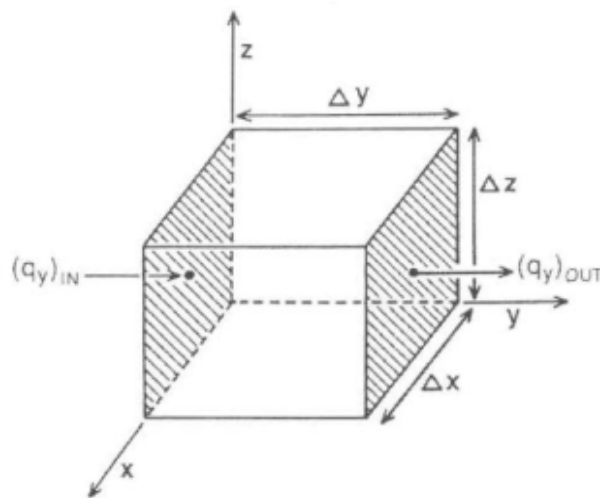
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

όπου K_x, K_y, K_z είναι οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα, S_s η ειδική αποθηκευτικότητα και R^* ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση εξάγεται συνδυάζοντας μαθηματικά την εξίσωση της ισορροπίας του νερού με το νόμο του Darcy. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε έναν κύβο πορώδους υλικού αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρό έτσι ώστε να μην παρατηρούνται αλλαγές στα υδραυλικά ύψη. Αυτός ο κύβος είναι γνωστός ως *αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος*. Ο όγκος του κύβου ισοδυναμεί με το γινόμενο $\Delta x \Delta y \Delta z$ και η ροή του νερού εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτωσης q , όπου q είναι το διάνυσμα το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τριών συστατικών με τη βοήθεια των μοναδιαίων διανυσμάτων, για το οποίο ισχύει:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z$$

όπου i_x, i_y, i_z τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y, z αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των εξισώσεων [Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992]

Η εξίσωση ισορροπίας του νερού είναι:

$$\text{Εκροή-Εισροή} = \text{Μεταβολές στην αποθηκευτικότητα}$$

Αν πάρουμε τη ροή στον y άξονα τότε η εισροή που λαμβάνει χώρα στον παραπάνω κύβο κατά το μέτωπο $\Delta x \Delta z$ ισοδυναμεί με $(q_y)_{IN}$ και η εκροή με $(q_y)_{OUT}$. Οπότε ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείων το ρυθμό εισροής για τον y άξονα είναι:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad \text{ή} \quad \frac{[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}]}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

ή αν παραλείψουμε τους όρους IN και OUT ο ρυθμός ροής στον y άξονα γίνεται:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y}(\Delta x \Delta y \Delta z)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να εκφράσουμε το ρυθμό της ροής και στους άξονες x και z , οπότε ο συνολικός ρυθμός της ροής θα ισοδυναμεί με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και θα είναι:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή αποθηκευτικότητας}$$

Στην περίπτωση που έχουμε πηγάδι άντλησης ή πηγάδι εμπλουτισμού, ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής αντιπροσωπεύεται από τον όρο $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$, όπου R^* είναι ένας θετικός όρος σε περίπτωση που έχουμε πηγάδι εμπλουτισμού, και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου. Ο παραπάνω τύπος δηλαδή στην περίπτωση αυτή διατυπώνεται ως εξής:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή αποθηκευτικότητας}$$

Οι μεταβολές της αποθηκευτικότητας ορίζονται από την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία καθορίζεται από τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής του υδραυλικού ύψους h και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

Κατά σύμβαση το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, δηλαδή όταν απελευθερώνεται νερό από τον υδροφορέα, το υδραυλικό ύψος μειώνεται οπότε ο ρυθμός αλλαγής της αποθηκευτικότητας είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και διαιρώντας με $\Delta x \Delta y \Delta z$ καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

3.4 Αριθμητικές μέθοδοι

Για την επίλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής γίνεται κυρίως χρήση αριθμητικών μεθόδων, η οποία όμως πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή για την αποφυγή αριθμητικού σφάλματος. Το συσσωρευμένο αριθμητικό σφάλμα δίνει λύσεις που δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι οι εξής:

- Πεπερασμένα στοιχεία
- Πεπερασμένες διαφορές
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Οριακή ολοκληρωτική μέθοδος
- Αναλυτικά στοιχεία

Από τις μεθόδους αυτές οι πιο διαδεδομένες είναι οι δύο πρώτες. Οι υπόλοιπες δεν είναι συχνά εφαρμόσιμες.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή ή ένας κώδικας μπορεί να επιλύσει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις χωρικές διαφορικές εξισώσεις (τη βασική εξίσωση, τις οριακές και αρχικές συνθήκες). Αυτές αποτελούν και το μαθηματικό μοντέλο. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων που ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο, το μετατρέπουν σε μορφή η οποία μπορεί εύκολα να επιλυθεί με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η διαδικασία της επίλυσης λοιπόν αποτελείται από δύο βήματα:

1. την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων σ' ένα μοντέλο και
2. την επίλυση των αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα αλγεβρικών εξισώσεων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι ιδιαίτερα εύκολη στην κατανόηση όσο και στον προγραμματισμό. Για την κατασκευή του πλέγματος απαιτούνται λίγα δεδομένα. Αυτό υπολογίζει μία τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο, η οποία αντιπροσωπεύει την μέση τιμή του τμήματος που περιβάλλει τον κόμβο αυτό. Αυτό που δεν υπολογίζεται είναι η διακύμανση του υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον άλλο.

Αντίθετα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται καλύτερη προσέγγιση ακανόνιστων σχημάτων και ορίων και καλύτερος χειρισμός ελαττωματικών ζωνών.

Επίσης προσομοιώνει καλύτερα τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης όπως και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του κινούμενου ύδατος. Καθορίζει την ακριβή τιμή του υδραυλικού ύψους σ' ένα κόμβο και προσδιορίζει τη διακύμανση του από κόμβο σε κόμβο.

3.5 Θεμελιώδες μοντέλο και κατασκευή πλέγματος

Σκοπός της κατασκευής του θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του έτσι ώστε όλο το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Για την κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου είναι απαραίτητα τρία βήματα:

1. Καθορισμός υδρογραφικών μονάδων

Γεωλογικές πληροφορίες που περιέχονται σε γεωλογικούς χάρτες συνδυάζονται με δεδομένα της υδρογεωλογίας για τον καθορισμό των υδρογραφικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Ως βάση των υδρογραφικών μονάδων χρησιμοποιούμε τα τοπικά συστήματα ροής, τους υδροφορείς και τα αδιαπέρατα στρώματα.

2. Καθορισμός υδατικού ισοζυγίου

Οι πηγές του συστήματος καθώς και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του μοντέλου. Στις εισροές συνυπολογίζεται η υπόγεια εναπόθεση από βροχόπτωση, επιφανειακή απορροή ή εναπόθεση από επιφανειακά νερά. Οι εκροές περιέχουν εξόδους από ανεξάντλητες πηγές, εναπόθεση σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Το υδατικό ισοζύγιο λοιπόν θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω δεδομένα και να υπολογίζει τις αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του υδροφορέα. Κατά τη βαθμονόμηση, το ισοζύγιο που προκύπτει από τα δεδομένα πεδίου συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από το μοντέλο.

3. Καθορισμός συστήματος ροής

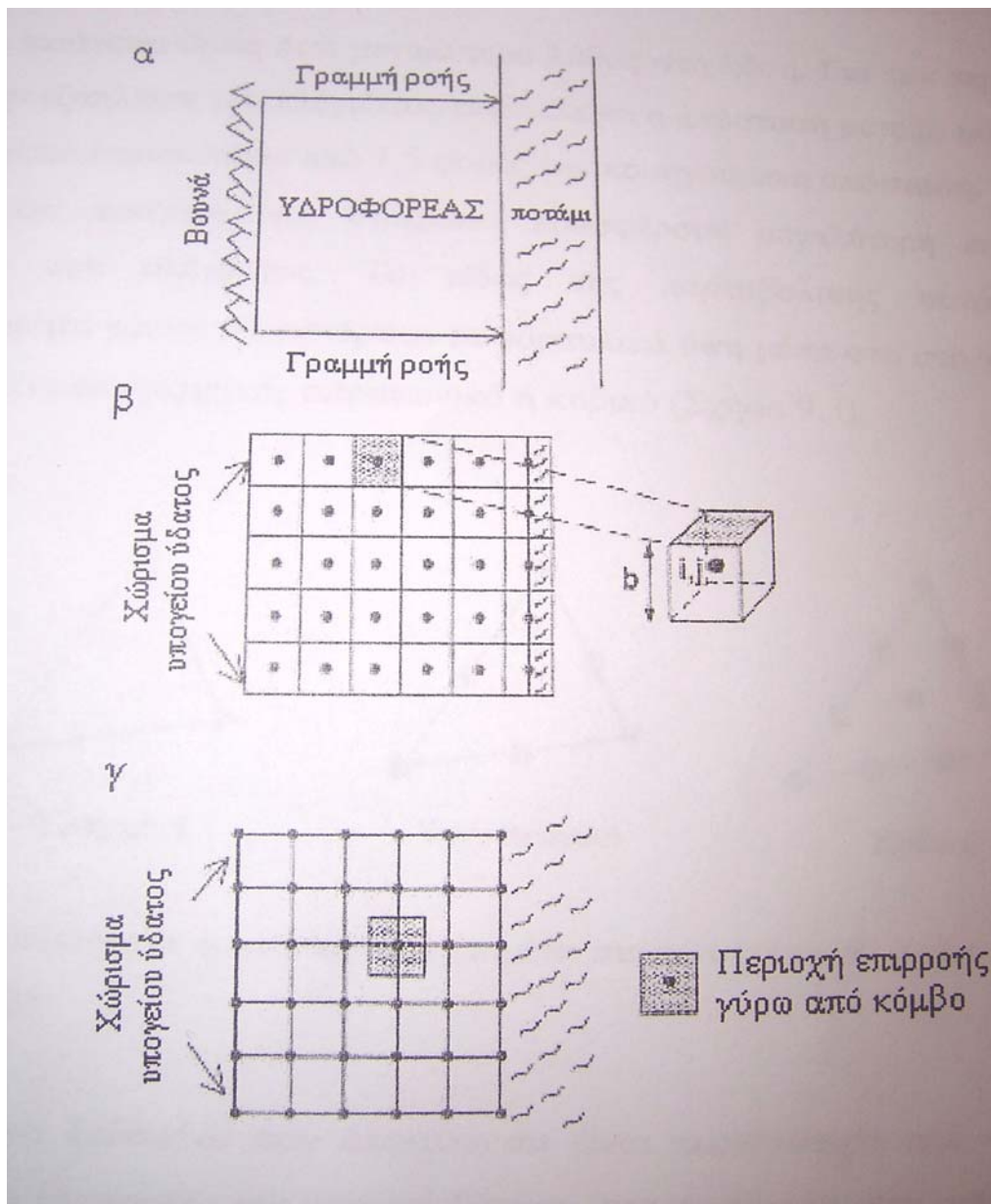
Οι υδρολογικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κίνησης του υπόγειου νερού του συστήματος, ενώ οι πληροφορίες για τη βροχόπτωση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή, τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση. Για τον καθορισμό της ροής μπορούμε να βασιστούμε αποκλειστικά και μόνο σε υδρολογικά δεδομένα, αλλά για πιο έγκυρο αποτέλεσμα καλό θα ήταν να γίνει χρήση πληροφοριών από τη γεωχημεία, όπως η χημεία του νερού, η συγκέντρωση των κυριότερων κατιόντων

(Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2}) και ανιόντων (SO_4^{-2} , HCO_3^- , Cl^-), μετρήσεις της θερμοκρασίας και του pH.

3.6 Σχεδιασμός πλέγματος

Η λειτουργία του αριθμητικού μοντέλου στηρίζεται πάνω στο πλέγμα των κόμβων, μαζί με τα πεπερασμένα στοιχεία ή τα κελιά των πεπερασμένων διαφορών. Το πλέγμα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις κύριες συνιστώσες του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x, y, z (δηλαδή με τα K_x , K_y , K_z). Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό και έχουμε έντονα το φαινόμενο της ανισοτροπίας, τότε στη βασική μαθηματική εξίσωση πρέπει να προστεθούν και οι εκτός διαγωνίου όροι του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επίσης σε μοντέλο πεπερασμένων διαφορών ο προσανατολισμός του πλέγματος πρέπει να γίνεται έτσι ώστε όσο το δυνατόν περισσότεροι κόμβοι να πέφτουν εντός των ορίων της περιοχής μελέτης. Η απόσταση που επιλέγεται μεταξύ των κόμβων είναι επίσης σημαντική και εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως είναι η καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα, η μεταβολή των υδραυλικών υψών, η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών του υδροφορέα, η έκταση της περιοχής μελέτης καθώς και οι μεταβολές στην άντληση και τον εμπλουτισμό.

Τα πλέγματα των πεπερασμένων διαφορών εμφανίζονται σε δύο τύπους: τα στοιχειοκεντρικά (block-centered) και τα δικτυοκεντρικά (mesh-centered). Στα στοιχειοκεντρικά πλέγματα οι οριακές συνθήκες ροής λαμβάνονται στα άκρα των τετραγώνων, ενώ στα δικτυοκεντρικά οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε κόμβο.



Σχήμα 3.3 Δισδιάστατα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Mary P. Anderson, William Woessner, 1992)

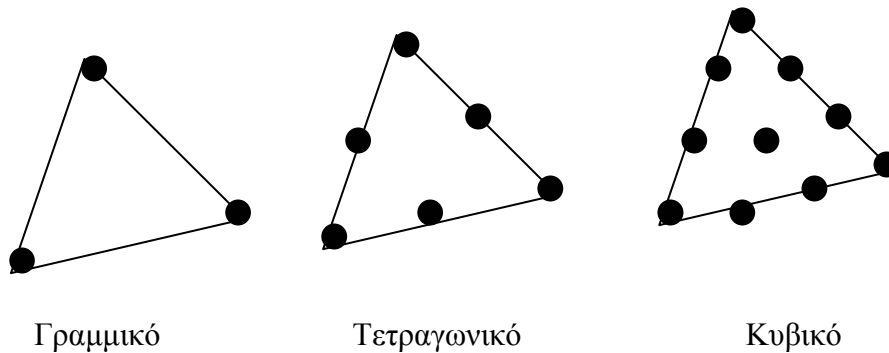
(α) Περιοχή προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνονται στη ζώνη των βουνών και κατά μήκος της γραμμής ροής. Το ποτάμι διαπερνά πλήρως τον υδροφόρα και μπορεί να αναπαρασταθεί με οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους.

(β) Στοιχειοκεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνονται στις πλευρές των τετραγώνων. Η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους λόγω του ποταμού λαμβάνεται πάνω στους κόμβους.

(γ) Δικτυοκεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής και σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς πάνω στους κόμβους.

Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας δείκτης (i, j, k) που δηλώνει τη γραμμή, τη στήλη και το επίπεδο στο οποίο αυτός βρίσκεται. Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων στις τρεις κατευθύνσεις ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) συνήθως μεταβάλλονται προσφέροντας μεγάλη ευχέρεια. Αυτό όμως καθιστά τη λύση πιο αναξιόπιστη. Για τον περιορισμό του λάθους και την εξάπλωση του πλέγματος πρέπει η απόσταση μεταξύ των κόμβων να μην αυξάνεται περισσότερο από 1,5 φορές την προηγούμενη απόσταση.

Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων προσφέρουν μεγαλύτερη ευχέρεια στον σχεδιασμό του πλέγματος. Η παρεμβολική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο καθορίζει αν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό.



Σχήμα 3.4 Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία (Mary P. Anderson, William W., Woessner, 1992)

Τα δεδομένα που εισάγονται είναι περισσότερα απ' ό,τι στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνουν την αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων, τις συντεταγμένες (x, y, z) κάθε κόμβου και τους κόμβους που σχετίζονται με κάθε στοιχείο. Κάθε στοιχείο εδώ αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και στη συνέχεια προκύπτει μια γενική εξίσωση, η οποία προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων όλων των στοιχείων. Για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών λαθών απαιτείται ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση κάθε στοιχείου να είναι κοντά στη μονάδα ή γενικά να μην ξεπερνάει το πέντε (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

3.7 Προσδιορισμός παραμέτρων και Μεταφορά τους στο πλέγμα

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα να εισαχθούν στο μοντέλο ροής των υπόγειων υδάτων είναι φυσικά, αφορούν δηλαδή τη γεωμετρία του συστήματος (πάχος, έκταση των υδροστρωματογραφικών μονάδων) καθώς και υδρογεωλογικά (υδραυλικά ύψη, πυκνότητα ροής, χαρακτηριστικά υδροφορέα). Η εύρεση των στοιχείων αυτών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς σε περίπτωση που τα στοιχεία από ήδη υπάρχουσες αναφορές είναι ανεπαρκή, επιβάλλεται επί τόπου εργασία στο πεδίο.

Στην προσομοίωση ανισοτροπικών υδροφορέων απαιτούνται πληροφορίες και για τις τρεις κύριες συνιστώσες του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας K_x , K_y , K_z . Η οριζόντια ανισοτροπία μπορεί να παρασταθεί με την αναλογία K_x/K_y και η κάθετη με την αναλογία K_x/K_z .

Ισοτροπικές υδρογεωλογικές μονάδες που εντοπίζονται στο χώρο μελέτης σε πολύ μικρή κλίμακα είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Όταν το πάχος του στρώματος του μοντέλου ($B_{i,j}$) είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του ισοτροπικού στρώματος ($b_{i,j}$), μπορεί να υπολογιστεί η υδρολογικά ισοδύναμη οριζόντια και κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος του μοντέλου από τις σχέσεις:

$$(K_x)_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}}$$
$$(K_z)_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{\sum_{k=1}^m b_{i,j,k} / K_{i,j,k}}$$
$$B_{i,j} = \sum_{k=1}^m b_{i,j,k}$$

Ο Hearne (1985) όμως συνέστησε την παρακάτω εξίσωση που αποδίδεται στον Theis και διορθώνει την επίδραση της στρωματοποίησης κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων. Αυτές στο μοντέλο προσομοιώνονται ως οριζόντια στρώματα:

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{R}{1 - (1 - R) \cos^2 A}$$

όπου: K_x η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση x

K_y η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση y

R ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας στην κατεύθυνση x προς την υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση y

A η γωνία της κλίσης.

Η μεταφορά των δεδομένων του πεδίου στο πλέγμα απαιτεί την συμβατότητά τους με την κλίμακα του μοντέλου και την καταχώρηση των χαρακτηριστικών του υδροφορέα σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του μοντέλου. Απαραίτητη κρίνεται και η παρεμβολή των μετρούμενων δεδομένων ούτως ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η χωρική μεταβλητότητα σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος.

Σε μοντέλο πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού πεπερασμένων διαφορών. Σε στοιχειοκεντρικό πλέγμα, οι ιδιότητες του υδροφορέα και οι τάσεις αποδίδονται στο τετράγωνο που περιβάλλει τον κόμβο. Σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων οι ιδιότητες του υδροφορέα αποδίδονται είτε στον κόμβο είτε στο στοιχείο (Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992).

3.8 Οριακές συνθήκες

Τα μαθηματικά μοντέλα γενικά περιέχουν τις θεμελιώδεις εξισώσεις, τις αρχικές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες. Με τον όρο οριακές συνθήκες εννοούμε μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (flux) στα όρια της περιοχής μελέτης. Οι αρχικές συνθήκες λοιπόν ορίζονται για να περιγράψουν την τιμή μιας παραμέτρου σε κάποιο αρχικό χρονικό σημείο ίσο με το μηδέν, ενώ οι οριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτης περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον.

Κατά την επιλογή των οριακών συνθηκών πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί καθώς αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για το σωστό σχεδιασμό, αφού ασκούν επίδραση στην επίλυση τους συστήματος. Επιπόλαιη αντιμετώπισή τους μπορεί να επιφέρει λάθος κατά το σχεδιασμό του μοντέλου.

Τα όρια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα φυσικά όρια των συστημάτων της υπόγειας ροής, στα οποία συγκαταλέγονται φυσικές υπόγειες υπάρξεις, όπως αδιαπέρατα στρώματα βράχων και μεγάλα επιφανειακά υδατικά σώματα, και
- Τα υδραυλικά όρια, τα οποία είναι κυρίως νοητά και περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και στρωτές ροές.

Τα υδρογεωλογικά όρια αντιπροσωπεύονται από τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών, οι οποίοι είναι:

- Οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους: όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο (συνθήκες Dirichlet).
- Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους: όρια συγκεκριμένης ροής, στα οποία η παράγωγος του υδραυλικού ύψους είναι δεδομένη. Για τις συνθήκες μηδενικής ροής τότε και η παράγωγος είναι μηδέν (συνθήκες Neumann).
- Οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους: οριακές συνθήκες ροής εξαρτημένες από το υδραυλικό ύψος, για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου υπολογίζεται με βάση ένα δεδομένο υδραυλικό ύψος. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται mixed καθώς συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής (Cauchy ή μικτές οριακές συνθήκες).

Κατά τον καθορισμό των ορίων πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη όλα τα δεδομένα σχετικά με τις εισροές και τις εκροές, έτσι ώστε η μορφή της ροής που θα προκύψει από το μοντέλο να ταιριάζει όσο το δυνατόν περισσότερο με την ροή του πεδίου. Γενικά είναι προτιμότερο να επιλέγονται φυσικά όρια που αποτελούν μέρος τους συστήματος, όπως αδιαπέρατοι βράχοι. Άλλα όρια που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- Αδιαπέρατοι βράχοι ως κατώτερο όριο του συστήματος
- Σημεία στα οποία η υδραυλική αγωγιμότητα διαφέρει μεταξύ τους τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους.
- Επιφανειακοί υδάτινοι αποδέκτες, οι οποίοι διεισδύουν σε υπόγειους υδροφορείς και αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους.
- Αδιαπέρατα στρώματα καθώς και υφάλμυρες ζώνες σε παραθαλάσσιους υδροφορείς.

Σε ένα σύστημα ροής υπάρχουν συνήθως καθορισμένες τιμές υδραυλικού ύψους και ροής, αλλά στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μόνο οριακές συνθήκες ροής μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στο ότι η θεμελιώδης εξίσωση γράφεται με τη μορφή παραγώγων ή διαφορικών του υδραυλικού ύψους κι έτσι η λύση που θα προκύψει δεν θα είναι μοναδική αλλά θα υπάρχουν κι άλλες. Στα προβλήματα σταθερών συνθηκών (steady states) απαιτείται ένας τουλάχιστον

οριακός κόμβος με καθορισμένο υδραυλικό ύψος έτσι ώστε να αποτελέσει τη βάση και να αρχίσει να υπολογίζει τις τιμές και στους άλλους κόμβους. Οι οριακές συνθήκες ροής σε συνδυασμό με τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος μπορεί να αποτελέσουν τη βάση για την επίλυση και άλλων σημαντικών προβλημάτων.

Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε φυσικά ή υδραυλικά χωρίσματα, τότε είμαστε αναγκασμένοι να επιλέξουμε άλλα. Αυτά όμως δεν πρέπει να επιφέρουν μεταβολές στην επίλυση του μοντέλου ούτε να διαμορφώνουν τη ροή του συστήματος διαφορετικά απ' ότι λαμβάνει χώρα στο πεδίο. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν δύο είδη τα οποία δεν συμπίπτουν με τα φυσικά τοπικά όρια:

- ♦ *Απομακρυσμένα όρια.* Σε παροδικές προσομοιώσεις, τα όρια είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένα αυθαίρετα και μακριά από το κέντρο του πλέγματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τις πιέσεις που δέχεται το σύστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και το υδραυλικό ύψος αλλά και η ροή γύρω από τα όρια να παραμένει αμετάβλητη. Μια παροδική προσομοίωση για παράδειγμα, στην οποία τα όρια δεν επηρεάζονται, είναι όταν γίνεται άντληση νερού μέσω πηγαδιών και υπάρχει περιορισμένος χρόνος είτε όταν γίνεται εισροή νερού από παρακείμενη πηγή όπως ποτάμι. Σ' αυτές τις περιπτώσεις το πλέγμα σχεδιάζεται με μικρές αποστάσεις των κόμβων στην περιοχή όπου εστιάζεται το πρόβλημα και κόμβοι με μεγαλύτερες αποστάσεις κοντά στα όρια.
- ♦ *Υδραυλικά όρια.* Τα όρια αυτά δεν συμπίπτουν με τα τοπικά και χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν μικρότερα προβλήματα. Μπορεί να είναι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μηδενικής ροής ή συγκεκριμένης οριακής ροής αλλά παρουσιάζεται να μιμείται τον τύπο της ροής που λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερα προβλήματα.

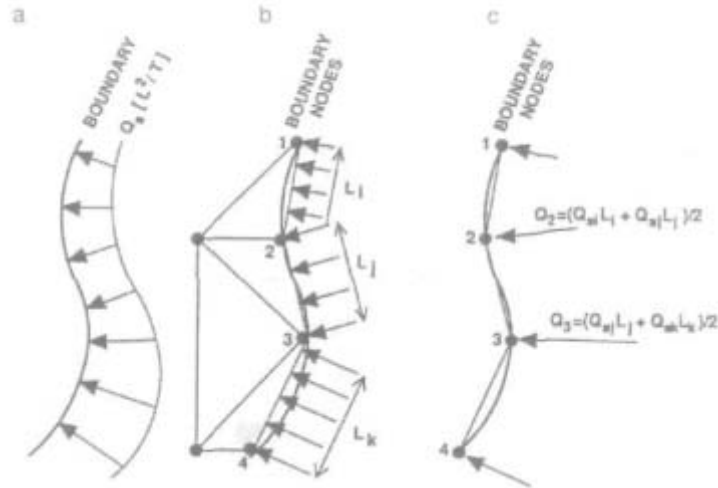
Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν σταθερές συνθήκες ροής όταν απαιτείται να γίνει η βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά όμως μπορεί να μην είναι αποδεκτά για παροδικά προβλήματα ή για προβλέψιμες προσομοιώσεις με σταθερές συνθήκες και αυτό γιατί το μοντέλο υποθέτει ότι οι συνθήκες στα όρια δεν αλλάζουν από τις αρχικές τιμές τους εκτός αν τις αλλάξει ο χρήστης του μοντέλου. Κάτω από παροδικές συνθήκες στο πεδίο, τα

υδραυλικά ύψη κατά μήκος των υδραυλικών ορίων μπορεί να αλλάξουν χάρη των πιέσεων που δέχονται από το σύστημα και επειδή το μοντέλο δεν επιτρέπει αυτή την αλλαγή, το αποτέλεσμα που θα προκύψει στο εσωτερικό του πλέγματος θα είναι λανθασμένο. Σ'αυτήν την περίπτωση είτε διευρύνονται τα όρια της περιοχής μελέτης είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές στις οριακές συνθήκες.

Κατά την προσομοίωση των ορίων, σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και mesh-centered οι κόμβοι θα πρέπει πάντα να συμπίπτουν με τα όρια, ενώ σε block-centered πλέγματα τα καθορισμένα υδραυλικά ύψη τοποθετούνται πάνω στους κόμβους και οι συνθήκες ροής έξω από αυτούς. Πιο συγκεκριμένα:

- Σε καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους, η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κατάλληλους κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Όταν το όριο είναι ένα ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού ποικίλει χωρικά, ενώ όταν είναι λίμνη ή κάποιος άλλος υδάτινος αποδέκτης τότε επικρατούν σταθερές συνθήκες. Σε δυσδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδατικά σώματα που διεισδύουν εξ' ολοκλήρου στον υδροφορέα ή το κάθετο μέσο υδραυλικό ύψος. Σε τρισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα της στάθμης του νερού ή επιφανειακά υδατικά σώματα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες προμήθειες νερού και ότι στο υπόγειο σύστημα είναι δυνατόν να συμβαίνουν εισροές και εκροές χωρίς να μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος, πράγμα που δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια, βέβαια, είναι δυνατόν να μεταβάλλεται, αρκεί η καινούρια τιμή να μπορεί να δικαιολογηθεί.
- Οι συνθήκες καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν ροές σε επιφανειακά υδατικά σώματα, υπόγειες πηγές και ποτάμια. Επίσης χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν υδραυλικά όρια σε τοπικά συστήματα ροής. Παρ' όλο που είναι προτιμότερες οι συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους, καθώς είναι ευκολότερες στον υπολογισμό και στη βαθμονόμηση, υπάρχουν περιπτώσεις που οι συνθήκες καθορισμένης ροής αποδίδουν περισσότερο σε συστήματα που η ροή παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε αντίθεση με το υδραυλικό ύψος. Στα μοντέλα

πεπερασμένων διαφορών τα όρια καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ο χρήστης τοποθετεί τη ροή ανάμεσα σε δύο κόμβους και το μοντέλο την επανατοποθετεί όπως φαίνεται στο σχήμα (3.5):



Σχήμα 3.5 Οριακές συνθήκες σ' ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με τριγωνικά στοιχεία: α. συνεχόμενη κατανομή της ροής κατά μήκος του ορίου, β. ξεχωριστή αναπαράσταση της ροής σε κάθε πλευρά του ορίου, γ. προσδιορισμός της ροής στους κόμβους [Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992]

- Συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνουν χώρα όταν η ροή κατά μήκος των ορίων είναι μηδέν, ενώ τα όρια μηδενικής ροής παρουσιάζονται σε αδιαπέρατους βράχους, σε ελαττωματικές ζώνες, σε υπόγεια χωρίσματα ή ακόμη και σε περιοχές που το θαλασσινό νερό συναντιέται με παραθαλάσσιους υδροφορείς. Σ' αυτή την περίπτωση τα υπόγεια νερά του υδροφορέα εκφορτίζονται στη θάλασσα διαμέσου μιας ζώνης διασποράς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται ένα μοντέλο που να επιτρέπει την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων που προέρχονται από τη διάχυση και διασπορά του θαλασσινού νερού. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια μηδενικής ροής προσομοιώνονται με το μηδενισμό της μεταβιβασιμότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά έξω από τα όρια. Τα περισσότερα μοντέλα όμως ορίζουν μηδενική ροή στα όρια και μόνο ο χρήστης τους μπορεί να παρέμβει και να αλλάξει αυτές τις συνθήκες.

- Η ροή κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους στη μία πλευρά του ορίου και της άλλης τιμής που υπολογίζει το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Η διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί ενώ στα δεύτερα υπολογίζεται για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, λίμνη ή αποθηκευτικό σώμα μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος. Η ροή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K_z}{b} (h_{source} - h)$$

όπου Q_L η ογκομετρική παροχή, και A η επιφάνεια του κελιού όπου λαμβάνει χώρα η διαρροή, h_{source} το υδραυλικό ύψος στην πηγή (λίμνη ή ποτάμι), h η τιμή του υδραυλικού ύψους κοντά στην πηγή, K_z η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της κοινής επιφάνειας και b το πάχος αυτής. Η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος της επιφάνειας του νερού μπορεί να υπολογιστεί με παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος, όπου η ροή θα εξαρτάται από το βάθος του νερού και από την επιφάνεια.

Όλες οι επιλογές που υπάρχουν για την προσομοίωση με οριακές συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο εσωτερικό του προβλήματος για να προσδιορίσουν πηγές ή σημεία συγκέντρωσης υπόγειου νερού ή ακόμη και για να προσδιορίσουν εσωτερικά όρια όπως λίμνες και ποτάμια που υπάρχουν στο εσωτερικό του πλέγματος.

[Πηγή Κεφαλαίου: Mary P. Anderson, William W. Woessner, *Applied Groundwater Modeling*, 1992]

4.Περιγραφή του μοντέλου PTC

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του μοντέλου PTC είναι να εισάγει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί περισσότερο για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για τους θεωρητικούς με αποτέλεσμα να επικεντρώνεται κυρίως στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και στη βιβλιογραφία για τις πηγές του νερού και όχι στις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη των εξισώσεων και στην ανάλυση του λάθους. Στη συνέχεια δίνονται οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου και η επίλυση του αλγόριθμου.

Βασικές Εξισώσεις

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για την αντιπροσώπευση της υπόγεια ροής, η οποία περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα, h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1.1)$$

τις συνιστώσες ταχύτητας υπόγειων νερών:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.2)$$

και τη μεταφορά ρύπων η οποία περιγράφεται από την συγκέντρωση C :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Όλες αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από τη μεταφορά μάζας και το νόμο του Darcy. Η επίλυση αυτών των εξισώσεων προκύπτει από την ακόλουθη μεθοδολογία: αρχικά επιλύουμε την εξίσωση (1.1) από την οποία βρίσκουμε την υδραυλική αγωγιμότητα h , έπειτα υπολογίζουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας Darcy V_x , V_y , V_z από την

εξ.(1.2), και τέλος επιλύουμε την εξ.(1.3) για την εύρεση της συγκέντρωσης μεταφοράς ρύπων C.

Αλγόριθμος επίλυσης του κώδικα PTC.

Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων (1.1)-(1.3) για σύνθετα φυσικά συστήματα, γενικά απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για τα συστήματα που αποτελούνται από διάφορους τομείς, η υπολογιστική προσπάθεια για την επίλυση αριθμητικού διαχωρισμού αυτών των εξισώσεων τριών διαστάσεων είναι πολύ μεγάλη. Ο κώδικας PTC υιοθετεί έναν μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την πλήρη επίλυση των εξισώσεων τριών διαστάσεων, ο οποίος μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει διαχωρισμό της περιοχής σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα. Ανάμεσα σε κάθε στρώμα χρησιμοποιείται διαχωρισμός [Pinder and Gray, 1977] για την ακριβή αντιπροσώπευση των ανώμαλων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται μεταξύ τους διανυσματικά με τον διαχωρισμό των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών παρέχει την ευκαιρία εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια της δοθείσας χρονικής επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί είναι χωρισμένοι σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, όλα τα οριζόντια πεπερασμένα στοιχεία διαχωρισμού επιλύονται το καθένα, ανεξάρτητα από τα άλλα. Στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι διανυσματικές εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.

4.2 Υπόγεια τρισδιάστατη ροή

Βασική εξίσωση

Ο κώδικας PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής των υπόγειων συστημάτων επιλύοντας την υδραυλική αγωγιμότητα μέσω της ακόλουθης μερικής διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.1)$$

όπου, χρησιμοποιώντας το βασικό σετ των μονάδων μήκους [L], χρόνου [T] και μάζας [M],

h είναι το υδραυλικό ύψος

K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια x κατεύθυνση [LT⁻¹]

K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια y κατεύθυνση [LT⁻¹]

K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z κατεύθυνση [LT⁻¹]

S είναι η ειδική αποθηκευτική ικανότητα [L⁻¹]

Q_i είναι η πηγή στην τοποθεσία i [L³T⁻¹] (π.χ, αντλίες, η θετική τιμή υποδηλώνει τον εμπλουτισμό)

δ() είναι η συνάρτηση Δέλτα

r είναι ο αριθμός των γεωτρήσεων

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος την (2.1) θα συμβολίζεται με Q.

Η κυρίαρχη εξίσωση (2.1) επιλύεται αριθμητικά από τον κώδικα PTC με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών.

Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιείται από τον κώδικα PTC για την επίλυση της εξίσωσης (2.1) περιλαμβάνει προσεγγιστικά τους όρους της με μεταβλητές x και y, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία γενικά χρησιμοποιούνται ευρέως (βλ, π.χ., Pinder και Gray, 1977).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί ότι υπάρχει ένα άπειρο άθροισμα λειτουργιών, το οποίο αντιπροσωπεύει ακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή.

Μια πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι:

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (2.2)$$

όπου h: το υδραυλικό ύψος [L]

\hat{h} : η προσέγγιση σειράς στο h [L]

h_i: ένας ακαθόριστος συντελεστής [L]

w_i : μια βασική (ή παρεμβαλλόμενη) λειτουργία (αδιάστατη), και

N : ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (2.2) παρέχει μια ακριβή αντιπροσώπευση καθώς το N προσεγγίζει το άπειρο (το \hat{h} προσεγγίζει το h). Από μία προσεκτική επιλογή της βάσης λειτουργιών w_i , οι ακαθόριστες μεταβλητές h_i γίνονται οι επικεφαλείς τιμές στους κόμβους με τις συντεταγμένες (x, y, z) . Ένα κλειδί στην υπολογιστική ικανότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση τμηματικά συνεχών λειτουργιών βάσης οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο πάνω σ' έναν μικρό υπο-τομέα της συνολικής περιοχής. Παρ' όλο που μπορεί να χρησιμοποιούνται πολλοί διαφορετικοί τύποι βασικών λειτουργιών [Lapidus και Pinder, 1982], ο κώδικας PTC κάνει χρήση τμηματικά γραμμικών λειτουργιών βάσης μεταξύ των παρακείμενων κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων εξελίσσεται σημειώνοντας ότι, παρ' όλο που ο διαφορικός χειριστής L (εξ.2.1) λειτουργώντας επάνω στο h είναι ίσος με το μηδέν, όταν λειτουργεί προσεγγιστικά εισάγεται λάθος. Στη μαθηματική ορολογία, μετασχηματίζουμε την εξ(2.1) ως εξής:

$$L(h) = 0 \quad (2.3)$$

ενώ

$$L(\hat{h}) = R \quad (2.4)$$

όπου R είναι το υφιστάμενο λάθος.

Για να επιλύσουμε την εξ.(2.1) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το υφιστάμενο λάθος R . Αυτό το καταφέρνουμε θεωρώντας αρχικά ένα ολοκληρωμένο πακέτο λειτουργιών w_j . Αν τώρα εξαναγκάσουμε το R να είναι κάθετο ως προς όλες τις πιθανές τιμές του w_j , ουσιαστικά εξαναγκάζουμε αυτό να είναι μηδενικό και έτσι με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε λύση για την εξ(2.1). Εκφράζοντας τα παραπάνω με άλλο τρόπο έχουμε:

$$L(\hat{h}) = L(h) \quad \text{όταν} \quad R = 0. \quad (2.5)$$

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί το ίδιο πακέτο λειτουργιών για τις σταθμισμένες μεταβλητές w_j όσον αφορά στις λειτουργίες βάσης w_i . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος του Garlekin. Αναλόγως, τα w_j και w_i χρησιμοποιούνται εναλλακτικά σ' αυτή την εργασία.

Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών

Κάνοντας εισαγωγή του όρου των πινάκων, όπου υπάρχουν έντονα κεφαλαία γράμματα συμβολίζουμε τετραγωνικούς πίνακες και όπου έντονα μικρά γράμματα διανύσματα στήλης, μετασχηματίζουμε την εξ.(2.9) σε μορφή πίνακα:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy \\ - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Επομένως έχουμε:

$$\mathbf{A} \mathbf{h} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = 0 \quad (2.10)$$

όπου \mathbf{A} και \mathbf{B} είναι $(N \times N)$ πίνακες και όπου \mathbf{h} , $\partial \mathbf{h} / \partial t$, \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι τα διανύσματα στήλης του N . Τα στοιχεία \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι:

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.11a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (2.11b)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (2.11c)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (2.11d)$$

όπου, όπως αναφέραμε και παραπάνω, το \mathbf{f} περιλαμβάνει γνωστές οριακές συνθήκες.

Το κάθετο παράγωγο

Το κεντρικό χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του υπολογιστικού κώδικα, είναι η χρήση ενός κεντρικού διαχωριστικού σχεδίου για τα παράγωγα διαστήματος στην κατεύθυνση z στην εξ.(2.11d). Ο διαχωρισμός των διανυσμάτων επιτυγχάνεται με την απαίτηση ότι το οριζόντιο πεπερασμένο στοιχείο του πλέγματος αναδιπλώνεται σε στρώματα με κόμβους οι οποίοι συσσωρεύονται ο ένας πάνω στον άλλο (βλ. Σχήμα 2.1). Αυτό σημαίνει ότι η διανυσματική κατεύθυνση μιας μονοδιάστατης εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της εξ.(2.11d). Χρησιμοποιώντας το k ως κάθετο δείκτη, με $k=1$ ως το κατώτατο στρώμα,

αυτή η προσέγγιση γράφεται σε πίνακα με τις παράγωγες ως εξής:

$$v \cong C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad (2.12)$$

όπου ο αρμονικός μέσος όρος των παρακείμενων ιδιοτήτων του στρώματος χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα στοιχεία του C_k^+ , του κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και k+1, καθώς και του C_k^- , του κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και k-1

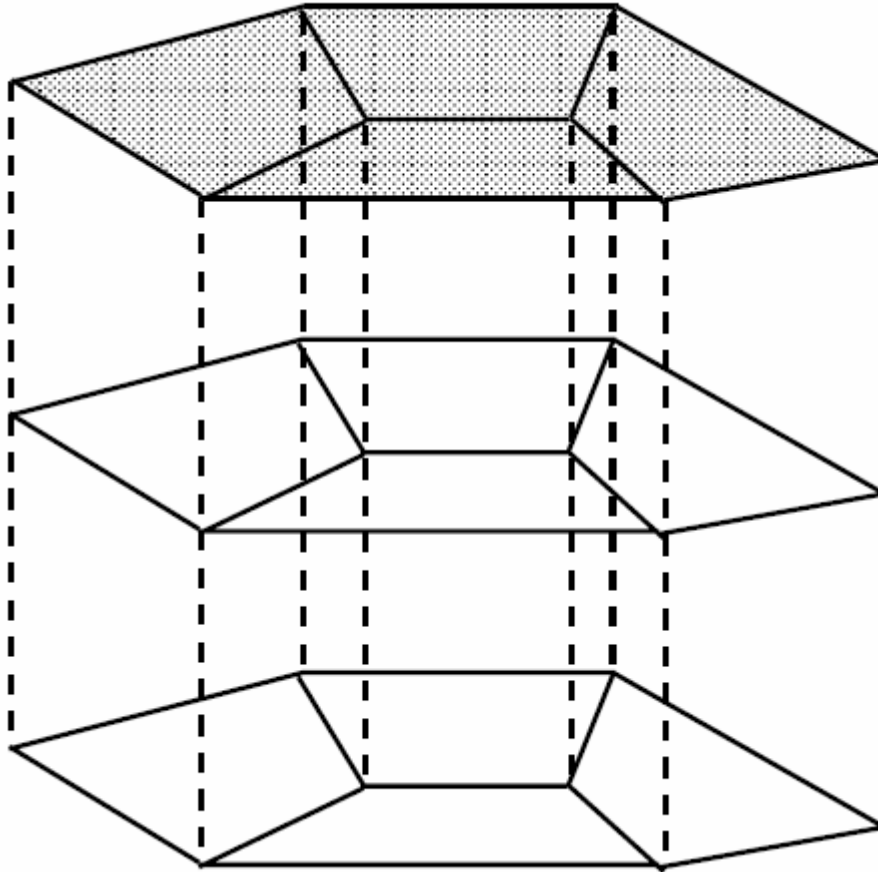
$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k [\Delta z_{k\pm 1} / (K z z)_k + \Delta z_k / (K z z)_{k\pm 1}]} w_i w_j dx dy \quad (2.13)$$

όπου (Δz_k) είναι το πάχος του στρώματος k στο σημείο της προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει τις πιο ρεαλιστικές ποσότητες στην ετερογενή κατάσταση κανονικά αντιμετωπισμένη.

Αντικατάσταση της εξ.(2.12) στην εξ.(2.10) παράγει την ακόλουθη έκφραση για ένα τυπικό k-οστό στρώμα:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - \left[C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \right] + f_k = 0 \quad (2.14)$$

Όπου το h_k αντιπροσωπεύει το διάνυσμα h της κορυφής του k-οστού στρώματος με $k=1, 2, \dots, M$, και M ο αριθμός των στρωμάτων στην z κατεύθυνση.



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων τοποθετημένων το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό.

Παράγωγος του χρόνου

Από εμπειρικούς λόγους έχει αποδειχθεί ότι μια ενδεχόμενη προσέγγιση διαφοράς κατευθυνόμενη προς τα πίσω με την παράγωγο του χρόνου, εξασφαλίζει την πιο αξιόπιστη λύση για τα προβλήματα υπόγειας ροής. Σύμφωνα μ' αυτή την προσέγγιση, ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται είναι για να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους που δίνονται σε καινούρια επίπεδα χρόνου. Επομένως εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην εξ(2.14) για κάθε στρώμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που εξασφαλίζεται με ένα σύστημα $M \times N$ εξισώσεων με N αγνώστους από την εξ(2.2) για κάθε M στρώματα

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k+1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0$$

4.3 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Αυτοί οι τρεις τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους), του Neumann (καθορισμένης ροής) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (της διαρροής). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδέν. Αυτό συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα καθώς και αδιαπέραστα στρώματα γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

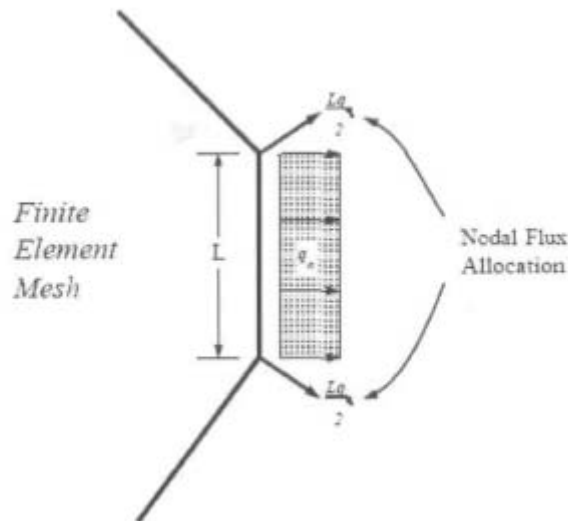
Καθορισμένο υδραυλικό ύψος

Τα όρια καθορισμένου ύψους καθορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους, ως σταθερούς όρους. Εφ'όσον οι κόμβοι που έχουν σταθερό υδραυλικό ύψος παραλείπονται από τη μαθηματική εξίσωση του πίνακα, απομένουν $(N \times M - N_C)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_C)$ αγνώστους με N_C τον ολικό αριθμό των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

Καθορισμένη ροή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των συνθηκών. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου με μήκος L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2).

----- ■



Σχήμα 4.2 Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία κάθε κόμβος έχει ισοδύναμη βαρύτητα. [Mary P. Anderson, William W. Woessner]

Έτσι ο χρήστης χρειάζεται μόνο να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται επίσης μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Για τη διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και αυτόματα κάνει ολοκλήρωση της περιοχής για να καθοριστεί η ογκομετρική ροή.

Τρίτου Τύπου

Στις οριακές συνθήκες τρίτου τύπου εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής, ο οποίος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση και ολοκληρώνεται στην περιοχή για να αναπαραστήσει την κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από το χρήστη, μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.

4.4 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα

Οι οριακές συνθήκες που απαιτούνται σε ένα ελεύθερο υδροφορέα είναι δύο και εφαρμόζονται στο πάνω όριο του υδροφόρου ορίζοντα. Μια σχηματική αναπαράσταση που περιλαμβάνει την κίνηση αυτού και το μέγεθος της διεύθυνσης $R(x,y,t)$ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το σταθερό υψόμετρο του πάνω ορίου

στο πεδίο ορισμού της ροής δίνεται από $z=z_{M+1}(x, y, t)$ και το πραγματικό υψόμετρο της στάθμης του νερού από $z=z_{WT}(x, y, t)$.

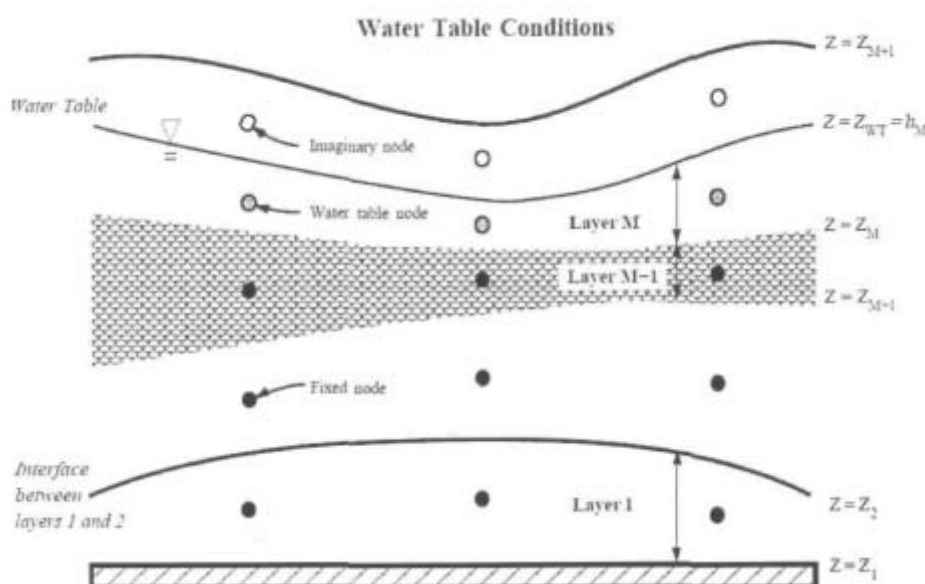
Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα στο ανώτερο στρώμα (h_M) καθορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος ($z_{WT}-z_M$).

Σύμφωνα μ' αυτό για κάθε κόμβο απαιτείται:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i.$$

Επίσης υποτίθεται ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται πάντα στην κορυφή του ανώτερου στρώματος ($k=M$). Έτσι όταν το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, κάνει έλεγχο και για το αν οι τιμές του h_M στους κόμβους βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές :

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$$



Σχήμα 4.3 Ο υδροφόρος ορίζοντας και οι συνθήκες που επικρατούν στο πάνω όριο. Η επιφάνεια δηλώνεται με $z=z_1$, $z=z_2$ είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. **Προσοχή:** ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας $z=z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$ [Mary P. Andeson, William W. Woessner, 1992]

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την προσωρινή ανταπόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διείσδυση. Ορίζοντας ως S_y το ενεργό πορώδες στη στάθμη του νερού, οι εξισώσεις ορίζονται ως εξής:

$$S_y = \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R$$

4.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

Βασικές εξισώσεις

Αρχικά, οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy V_x , V_y και V_z είναι υπολογισμένες ως ποσότητες του μέσου όρου των στοιχείων.

Η εξίσωση μεταφοράς (1.3) είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) \\ - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Οι όροι διασποράς στην εξ.(3.1) καθορίζονται (κατά τους Burnett και Frind [1987]) ως εξής:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\ D_{yy} &= (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\ D_{zz} &= (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2)/V + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y / V \\ D_{yz} &= D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) V_y V_z / V \\ D_{zx} &= D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V) V_z V_x / V \end{aligned} \quad (3.2)$$

και οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές είναι:

D_M είναι ο μοριακός συντελεστής διάχυσης, γενικά μικρός $[L^2/T]$,

α_L είναι ο διαμήκης διασκορπισμός $[L]$,

α_T είναι ο οριζόντιος εγκάρσιος διασκορπισμός $[L]$,

α_V είναι ο κατακόρυφος εγκάρσιος διασκορπισμός $[L]$,

V είναι το μέγεθος του διανύσματος ταχύτητας $[L/T]$ ($V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$),

c είναι η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) κατά τη χρονική στιγμή t $[M/L^3]$,

θ είναι το πορώδες του υδροφόρου στρώματος (αδιάστατο),

$E(c)$ είναι η λειτουργία που αντιπροσωπεύει τις χημικές ιδιότητες προσρόφησης,

Q είναι η (πηγή/νεροχύτης) δύναμη της άντλησης $[1/T]$ ($Q \equiv Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i)$),

Q_i είναι το ογκομετρικό ποσοστό εγχύσεων/απαλλαγής [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

c^w είναι η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

$\delta()$ είναι η συνάρτηση Δέλτα.

Για όλες τις περιπτώσεις της άντλησης από μια αντλία ($Q_i \leq 0$), συμπεραίνουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου (υγρού) νερού c^w στην αντλία ισούται με την συγκέντρωση του περιβάλλοντος ύδατος c . Όμως, για όλες τις αντλίες, ο όρος $Q(c^w - c) \equiv 0$ στην εξ.(3.1). Ο κώδικας γι' αυτό λοιπόν διατηρεί τους όρους με Q στην εξ.(3.1) μόνο όταν η αντλία εγχύει ($Q_i > 0$) το διάλυμα, με την συγκέντρωση c^w να αντιπροσωπεύει την συγκέντρωση του εγχυόμενου υγρού.

[Πηγή Κεφαλαίου: PTC Manual]

5. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

5.1 Γενικές πληροφορίες για το νομό Λασιθίου

Ο Νομός Λασιθίου είναι ο ανατολικότερος νομός της Κρήτης. Στις τρεις πλευρές του το Λασιθί βρέχεται από θάλασσα : το Κρητικό πέλαγος από τα βόρεια, το Ικάριο ανατολικά και το Λιβυκό πέλαγος στα νότια. Δυτικά είναι ο Νομός Ηρακλείου με φυσικό όριο την οροσειρά Δίκτη.

Πρωτεύουσα του νομού Λασιθίου είναι ο Άγιος Νικόλαος.

Οι μέσες συντεταγμένες του νομού είναι N 35ο 05', E 25ο 50' και η έκτασή του 1.818 τετραγωνικά χιλιόμετρα , από τα οποία 23,58 είναι τα γύρω νησιά που ανήκουν σε αυτόν.



Σχήμα 5.1 Νομός Λασιθίου

Οικονομία

Συγκεντρώνει περίπου το 0,7% του πληθυσμού της χώρας. Μεταξύ των απογραφών 1991 και 2001 ο πληθυσμός του νομού αυξήθηκε κατά 7,1% (ΕΣΥΕ). Έχει τον μικρότερο πληθυσμό και ταυτόχρονα το μεγαλύτερο ΑΕΠ κατά κεφαλή (14,8 χιλ.ευρώ) από τους άλλους νομούς της Κρήτης και αυτό τον κατατάσσει 8ο στην Ελλάδα ως προς το κριτήριο αυτό (115% του Μ.Ο της Ελλάδας και 90% του Μ.Ο της ΕΕ-25).

Παράγει το 0,8% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος της χώρας. Το 75% του προϊόντος του προέρχονται από τις υπηρεσίες, με σημαντική τη συμβολή του τουρισμού (16% από υπηρεσίες ξενοδοχείων και εστιατορίων). Το 14% του προϊόντος του προέρχεται από τη γεωργία το 2002, από 16% το 1997 (παράγει το 1,5% του συνολικού γεωργικού προϊόντος της χώρας). Είναι η 6η παραγωγός περιοχή ελαιολάδου στη χώρα με 4,8% το 2004 , η 6η στην παραγωγή πατάτας με 5% το 2004 και 7η στην παραγωγή ντομάτας .

Διοίκηση

Στο Νομό Λασιθίου τρία είναι τα μεγάλα αστικά κέντρα, ο Άγιος Νικόλαος, η Ιεράπετρα που είναι η μεγαλύτερη σε πληθυσμό πόλη του νομού και η Σητεία.

Γεωγραφία

Το έδαφος είναι κυρίως ορεινό, με την οροσειρά Δίκτη (ή αλλιώς Λασιθιώτικα όρη) που κυριαρχεί στα όρια των νομών Λασιθίου και Ηρακλείου, να καταλαμβάνει εξ' ολοκλήρου την επαρχία Λασιθίου και μέρος των επαρχιών Μιραμπέλλου και Ιεράπετρας. Μια δεύτερη οροσειρά , τα Στειακά όρη, βρίσκονται στα ανατολικά του νομού.

Κοιλάδες με ελαιόδενδρα υπάρχουν στην Ιεράπετρα και τη Νεάπολη κι άλλες μικρότερες ανάμεσα στα βουνά ,συχνά κοντά στα παράλια.

Υπάρχουν δύο οροπέδια , το πιο γνωστό του Λασιθίου και το οροπέδιο του Καθαρού (στο Δ.Δ. Κριτσάς του Δήμου Αγίου Νικολάου).

Φαράγγια υπάρχουν αρκετά με πιο μεγάλο αυτό του Χα (στο 24ο χιλιόμετρο Αγίου Νικολάου - Ιεράπετρας στην πλαγιά Παπούρα).

Δεν υπάρχουν αξιόλογα ποτάμια, παρά μόνο χείμαρροι και τα μόνο εμφανή νερά είναι διάφορες πηγές που εκμεταλλεύονται στην ύδρευση και την άρδευση.

Η ακτογραμμή του Νομού Λασιθίου είναι ποικίλη με ένα μεγάλο κόλπο (Μεραμπέλλου) , μια λιμνοθάλασσα (Βουλισμένη Αγίου Νικολάου) εκτεταμένες παραλίες , μικρά και μεγάλα λιμάνια στο βορρά (Ελούντας, Σητείας, Πόρου και Φανερομένης) , τα λιμάνια Γκράντε, Καρούμπι και Ζάκρος στα δυτικά και στα νότια Μακρύγιαλος και Καλά Νερά.

Τα ακρωτήρια του νομού είναι του Αγίου Ιωάννη , Φανερωμένης , Σίδερου (Αγίου Ισιδώρου) , Ζάκρου και Πλάκα.

Τα νησιά που ανήκουν στο νομό είναι πολλά και ενδιαφέροντα, το καθένα για το δικό του λόγο. Η Σπιναλόγκα, το νησί ενετικό οχυρό που χρησιμοποιήθηκε κι ως τόπος συγκέντρωσης των Χανσενικών (λεπρών), οι Άγιοι Πάντες που είναι καταφύγιο των κρητικών αιγάγων (κρι-κρί) , η Κολοκύθα , η Ψείρα, οι Διονυσάδες με αρχαία ευρήματα, η Ελάσα, το Κουφονήσι, η Χρυσή με ένα ενδημικό είδος κέδρου κ.α.

[Πηγή: www.crete-region.gr]

5.2 Κλιματολογικά στοιχεία:

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται γενικά ως εύκρατο μεσογειακό, το οποίο στους ορεινούς όγκους τείνει να διαφοροποιηθεί παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά ηπειρωτικού τύπου. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 14 και 15 °C.

Η θέση που κατέχει η Κρήτη στην Ανατολική Μεσόγειο την καθιστά προνομιούχο σχετικά με την ηπιότητα του κλίματος και των μεταβολών του. Ο χειμώνας, ο οποίος συνήθως ξεκινά από τα μέσα Δεκεμβρίου, είναι ήπιος με ψυχρότερους μήνες τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο. Η πεδινή Κρήτη και ιδιαίτερα το ανατολικό της τμήμα είναι μία από τις θερμότερες περιοχές της Ελλάδας. Η ηλιοφάνεια διαρκεί σχεδόν όλους τους μήνες του έτους με μεγαλύτερη ένταση τους μήνες από Απρίλιο μέχρι Οκτώβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, αλλά γενικά λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων, το θέρος είναι σχετικά δροσερό. Η

παρουσία νεφώσεων είναι μικρή με τάση μείωσης από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα παράλια προς την ηπειρωτική χώρα.

Ο νομός Λασιθίου υπάγεται κατά το μεγαλύτερο μέρος του στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ημιορεινές περιοχές ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό, ενώ οι ορεινές περιοχές (οροπέδιο Λασιθίου) ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό.

[Πηγή: www.meteo.gr]

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754											
Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2											
Ύψος σταθμού 38m											
Μήνα ς	Ώρες Ηλιο- φάνει ας	Βαρομε- τρική πίεση	Μέση θερμοκρ ασία αέρα	Απόλυτ η μέγιστη θερμοκρ ασία	Απόλυτ η ελάχιστ η θερμ.	Σχετική υγρασία	Μέση νέφωσ η	Βροχό πτωσ η	Ολική ηλιακή ακτινοβ ολία	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβ ολία	Ταχύτητα ανέμου
	h	Mm Hg	oC	oC	oC	%	8	Σε mm			m/sec
1	108,8	1017,1	12,2	24,8	0,2	71	5,3	90,1	67,33	35,22	3,8
2	128,4	1016	12,5	29,2	-0,5	69	5,1	67,6	82,54	40,67	4
3	170,3	1014,9	13,8	34,8	1,7	66	4,8	58,2	124,87	58,28	4
4	234,5	1013,3	16,8	36	4,4	64	3,7	28,5	161,88	62,74	3,4
5	314,3	1013,6	20,8	39	7	64	2,9	14,2	213,96	62,15	2,3
6	353,3	1012,6	24,4	45,7	8,7	59	1,4	3,5	230,23	56,2	3
7	384,7	1011	26,4	41	15	59	0,6	1	248,99	54,12	4
8	356,7	1011,4	26,3	40,7	14	60	0,7	0,6	221,15	51,13	4
9	285,2	1014,6	23,7	38,5	10,6	63	1,8	17,7	174,12	42,92	3,4
10	197,2	1016,7	20,3	36,2	7,9	67	3,6	64,9	114,20	44,54	3,2
11	161,5	1017,5	17,1	31,9	1,9	70	4,7	59	81,54	33,62	3
12	121,1	1016,8	13,9	26,7	2	70	5,1	77,9	64,60	30,79	4
Σύν.	2816								1785,43	572,39	

Πηγή: E.M.Y.

Βροχοπτώσεις

Η περίοδος των βροχοπτώσεων είναι κυρίως τους χειμερινούς μήνες από Οκτώβριο μέχρι Μάρτιο με ετήσιο ύψος βροχής 485 mm περίπου. Συγκεκριμένα στην πόλη της Σητείας η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε **490 mm**. Κατά τη διάρκεια του έτους όμως η κατανομή είναι ανομοιόμορφη με ελάχιστο τους καλοκαιρινούς μήνες με 0,5mm περίπου τον Ιούλιο και μέγιστο τον Ιανουάριο με 90mm βροχής. Χιονοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή δεν υπάρχουν μιας και το φαινόμενο για τη νήσο είναι ιδιαίτερα σπάνιο. [Πηγή: www.meteo.gr]

Θερμοκρασία

Στην Κρήτη υπάρχουν 31 σταθμοί μέτρησης της θερμοκρασίας αέρος. Η θερμοβαθμίδα του Υ.Δ ανέρχεται σε **-4,2 °C / 1000 m** που θεωρείται αντιπροσωπευτική για το θερμό και ξηρό κλίμα της Κρήτης. Από την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών δεδομένων των σταθμών αυτών, προέκυψε ότι:

- ◆ Η μέση θερμοκρασία εμφανίζεται μεγαλύτερη στα ανατολικά από ότι στα δυτικά (18,38 έναντι 16,96 °C) και μεγαλύτερη στα νότια από ότι στα βόρεια (19,55 έναντι 18,55 °C).
- ◆ Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ανέρχεται σε 17 °C περίπου για τους τρεις σταθμούς (Σητεία, Αλικιανός και Ηράκλειο) ενώ στην Ιεράπετρα το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ανέρχεται σε 20 °C.
- ◆ Θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Ιούλιος με μέση υπερετήσια θερμοκρασία περίπου 25 °C. Ο Ιούνιος εμφανίζει χαμηλότερη θερμοκρασία τόσο από τον Ιούλιο όσο και από τον Αύγουστο, παρουσιάζει όμως τα ίδια επίπεδα θερμοκρασίας με τον Σεπτέμβριο. Η μέση υπερετήσια θερμοκρασία του τελευταίου ανέρχεται σε 23 °C για τους σταθμούς Σητείας και Ηρακλείου ενώ είναι χαμηλότερη στον Αλικιανό (21,5 °C) και υψηλότερη στην Ιεράπετρα (25 °C). Οι θερμοκρασίες αυτές προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό και τη χρονική διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, η οποία σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης καλύπτει 4 τουλάχιστον μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος). [Πηγή: www.meteo.gr]

Ανεμολογικά στοιχεία

Στην περιοχή επικρατούν κυρίως άνεμοι του Βόρειου τομέα (50%), ενώ συχνά πνέουν και νότιοι άνεμοι (14%). Πολύ μικρή συχνότητα παρουσιάζουν οι νηνεμίες σε ποσοστό περίπου 17%.

Η ένταση των ανέμων είναι κυρίως της τάξης 2, 3 και 4 Beaufour με συνολικό ποσοστό περίπου 65%. Ακραία καιρικά φαινόμενα της τάξης των 10 Beaufour παρουσιάζονται σπάνια και όταν συμβαίνουν είναι κυρίως νότιας και νοτιοδυτικής διεύθυνσης. [Πηγή: www.meteo.gr, www.emy.gr]

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754										
Γεωγραφικό μήκος 25,11 / Γεωγραφικό πλάτος 35,2										
Ύψος σταθμού 38m										
BEAU F	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CAL M	SUM
0									17.52 7	17.52 7
1	0.855	0.53 7	0.37 2	0.61 3	1.468	0.60 3	0.30 7	0.646		5.401
2	4.360	2.27 9	0.96 5	2.13 2	5.149	1.88 4	1.18 3	3.725		21.84 5
3	4.491	1.43 5	0.60 3	1.18 3	2.695	0.86 5	1.49 0	9.082		22.29 4
4	4.229	0.43 8	0.14 2	0.65 7	2.241	0.67 9	1.32 6	10.64 9		20.54 1
5	1.665	0.14 2	0.03 3	0.35 1	1.589	0.44 9	0.36 2	3.571		8.162
6	0.690	0.03 3	0.01 1	0.20 8	0.898	0.20 8	0.08 8	1.019		3.155
7	0.164	0.01 1	0.01 1	0.06 6	0.274	0.05 5	0.02 2	0.142		0.745
8	0.055	0.00 0	0.00 0	0.03 3	0.110	0.01 1	0.01 1	0.044		0.264
9	0.011	0.00	0.00	0.01	0.011	0.00	0.00	0.011		0.044

		0	0	1		0	0			
10	0.000	0.00	0.00	0.01	0.011	0.00	0.00	0.000		0.022
		0	0	1		0	0			
11	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000		0.000
		0	0	0		0	0			
SUM	16.97	4.87	2.12	5.44	14.62	4.75	4.78	28.88	17.52	100.0
	0	5	5	5	6	4	9	5	7	0

Πηγή: E.M.Y.

5.3 Σεισμικότητα περιοχής

Η Ελλάδα χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες σε σχέση με την σεισμική επικινδυνότητα κάθε περιοχής. Η θέση που κατέχει η Κρήτη γεωγραφικά την κατατάσσει στην κατηγορία ΙΙΙ.

5.4 Χλωρίδα-Πανίδα - Φυτοκάλυψη περιοχής

Στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν οικοσυστήματα πεδινής και ημιορεινής ζώνης ενώ επικρατεί κυρίως αυτοφυής υποβαθμισμένη βλάστηση. Εκτός, λοιπόν, από τις πεδινές περιοχές που καταλαμβάνουν μικρή έκταση, υπάρχουν ορεινές και λοφώδεις κυρίως δασικές περιοχές και παραθαλάσσιες αμμώδεις και βραχώδεις περιοχές. Η χλωρίδα της περιοχής μελέτης αποτελείται από δέντρα, θάμνους και ποώδη βλάστηση και πιο συγκεκριμένα από: φρύγανα, αστιβίδες, θυμάρια, αφάνες και ασπαλάθους. Το λιγυστό πεδινό έδαφος που υπάρχει, όπως προαναφέρθηκε, καλύπτεται από καλλιέργειες ελαιόδεντρων και θερμοκήπια. Να αναφέρουμε ακόμη ότι τμήματα αυτού καλύπτονται από αραιές στοιβάδες ξυλώδους βλάστησης σκληρόφυλλων και αείφυλλων (σχοίνος, χαρουπιά, πρίνος, κ.α.)

Οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη της πανίδας ιδιαίτερα των αρθρόποδων, των εντόμων, των αραχνοειδών και των μαλακίων (σαλιγκάρια). Αντίθετα ο αριθμός των ζώων που ανήκουν στις ανώτερες τάξεις, των πτηνών καθώς και των θηλαστικών, είναι περιορισμένος εξαιτίας της τουριστικής ανάπτυξης, της παράνομης θήρευσης και γενικά της εκμετάλλευσης των φυτικών και ζωικών οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο. Σπάνια είδη ή προστατευόμενα δεν υπάρχουν, εκτός ίσως από το χαρακτηριστικό είδος κατσικιού Κρι Κρι που εντοπίζεται στη νήσο Κρήτη. Τα κύρια είδη της πανίδας είναι ο λαγός, το κουνάβι, η

κουκουβάγια, οι σαύρες καθώς και διάφορα είδη πουλιών.*[Πηγή:Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου, Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε]*

5.5 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η νήσος Κρήτη ανήκει στον νότιο κλάδο του αλπικού γεωσυγκλίνου και συγκεκριμένα στο τμήμα εκείνο που αποτελεί γεωτεκτονική μετάβαση από τις Ελληνίδες στις Ταυρίδες οροσειρές. Χαρακτηρίζεται αρχικά από πτυχογόνο τεκτονική που επέδρασε από Βορρά προς Νότο με άξονες πτυχών που παρουσιάζουν γενική διεύθυνση Α-Δ περίπου και μεταγενέστερα από ρηγματογόνο τεκτονική η οποία συνεχίζεται μέχρι και σήμερα και στην οποία σε μεγάλο βαθμό οφείλεται η σημερινή μορφολογική εικόνα. Τα συστήματα ρηγμάτων που επικρατούν έχουν διευθύνσεις Α-Δ, Β-Ν, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Ανατολικό τμήμα της νήσου Κρήτης και αποτελεί ζώνη που το βόρειο τμήμα της βρέχεται από το Κρητικό πέλαγος και το νότιο από το Λιβυκό.

Η περιοχή που μελετάμε δομείται από ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών που ανήκουν τόσο στην αυτόχθονη σειρά της Ιονίου ζώνης, όσο και στα επωθημένα καλύμματα της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς, της ζώνης Τριπόλεως και της ζώνης Πίνδου-Μαγκασσά. Επίσης, σημαντική έκταση καταλαμβάνουν οι νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί.

Να σημειωθεί ότι ιδιαίτερη σημασία έχουν οι υδροπερατοί σχηματισμοί (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) καθώς μέσα σε αυτούς αναπτύσσονται οι υδροφορείς. Οι λοιποί γεωλογικοί σχηματισμοί (μάργες και άργιλοι) είναι αδιαπέρατοι λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους και δεν επιτρέπουν στο νερό της βροχής να διεισδύσει σε βάθος.

[Πηγή: Βιδάκης Μ., Γαλανάκης Δ., Μυλωνάκης Ι., Παπαζέτη Ε., Πομόνη-Παπαϊωάννου Φ., Σκουρτή-Κορωναίου Β., Η γεωλογική δομή των περιοχών Σητείας-Λιθινών ,Ανατολική Κρήτη, Ι.Γ.Μ.Ε.]

5.5.1 Διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων

Η διαμόρφωση των υδροφόρων οριζόντων εξαρτάται κυρίως από την βροχόπτωση, τους γεωλογικούς σχηματισμούς που είναι υδροπερατοί και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη τεκτονική μορφή. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις τα νερά της βροχής διεισδύουν στα πετρώματα, συγκεντρώνονται στους πόρους, τα καρστικά και

τεκτονικά διάκενα και διαμορφώνουν υπόγειους δυροφόρους ορίζοντες και υδρογεωλογικές λεκάνες.

Στην περιοχή εντοπίζονται οι ορεινοί όγκοι Ψηλορείτης και Δίκτη, οι οποίοι αποτελούν τους κύριους τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής. Αυτή χωρίζεται στις ακόλουθες υδρογεωλογικές ενότητες:

- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη
- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη
- Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων
- Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου

Η Υδρογεωλογική ενότητα που επηρεάζει άμεσα την περιοχή μελέτης είναι αυτή του καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη, καθώς ο ορεινός όγκος ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο νομό Λασιθίου. Αποτελείται κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης. Τον κύριο κορμό του αποτελούν Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας πάνω στη οποία έχουν απωθηθεί αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων-κρυσταλλοσχιστοδών, ενώ το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελούν Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης ενότητας Κρήτης πάνω στην οποία έχουν απωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες. *[Πηγή: Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου, Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε)*

6.Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης της Σητείας με τη χρήση του μοντέλου PTC.

6.1 Εισαγωγή

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Λασιθίου της Ανατολικής Κρήτης. Περιλαμβάνει τα Βόρεια παράλια του νομού και εκτείνεται δυτικά της πόλης της Σητείας. Νότια φτάνει μέχρι την ορεινή ενδοχώρα, όπου βρίσκονται τα όρη Πισκοκέφαλο και Πλατύβολο. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται οι γεωτρήσεις που μας ενδιαφέρουν και για τις οποίες θα κάνουμε προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρισης.



Σχήμα 6.1 Τοπογραφικός χάρτης του νομού Λασιθίου όπου φαίνεται οριοθετημένη η περιοχή μελέτης καθώς και η τοποθεσία των γεωτρήσεων σε αυτήν.

Για να μπορέσει το μοντέλο PTC να κάνει προσομοίωση της περιοχής μελέτης και του υπόγειου υδροφορέα που υπάρχει εκεί, πρέπει να εισάγουμε αρχικά κάποια βασικά στοιχεία που την χαρακτηρίζουν. Αυτά θα μας οδηγήσουν επίσης και στον προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρινσης της περιοχής. Τα συγκεκριμένα στοιχεία αφορούν τον τύπο του υδροφορέα, τις υδραυλικές αγωγιμότητες και τα υψόμετρα της περιοχής, δημιουργώντας μ' αυτό τον τρόπο μέσα στο μοντέλο ένα ομοίωμα της. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή στοιχείων σχετικών με την τοποθεσία των γεωτρήσεων που εξετάζουμε στην περιοχή, τους ρυθμούς άντλησης αυτών, τη βροχόπτωση, τις αρχικές και οριακές συνθήκες καθώς και με τον χρόνο προσομοίωσης. Με τη χρήση αυτών των στοιχείων το μοντέλο PTC επιτυγχάνει αναπαράσταση της περιοχής

δίνοντας σε μας ως αποτέλεσμα το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα και τις ταχύτητες του νερού στην οριζόντια (x) και κάθετη (y) διεύθυνση. Το μοντέλο μας δίνει παράλληλα τη δυνατότητα υπολογισμού της συγκέντρωσης ενός ρύπου στον υδροφορέα εξαιτίας της μεταφοράς του από το νερό.

6.2 Χάρτες

Για τη δημιουργία του ομοιώματος της υπό μελέτη περιοχής εισάγουμε στο μοντέλο τρεις χάρτες της περιοχής. Ο καθένας από αυτούς αποτελεί ένα στρώμα (layer) καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο λειτουργεί κατ' αυτό τον τρόπο. Στη συνέχεια επεξεργαζόμαστε τους χάρτες με σκοπό να τους φέρουμε στην ίδια κλίμακα (1:50000) και ο ένας να καλύπτει τον άλλο με τέτοιο τρόπο ώστε το σημείο ενός χάρτη να συμπίπτει με το αντίστοιχο στους άλλους χάρτες. Οι χάρτες αυτοί περιέχουν στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής (τοπογραφικός), για τη γεωλογία της (γεωλογικός) καθώς και για την ακριβή τοποθεσία των γεωτρήσεων της περιοχής (υδρολογικός).

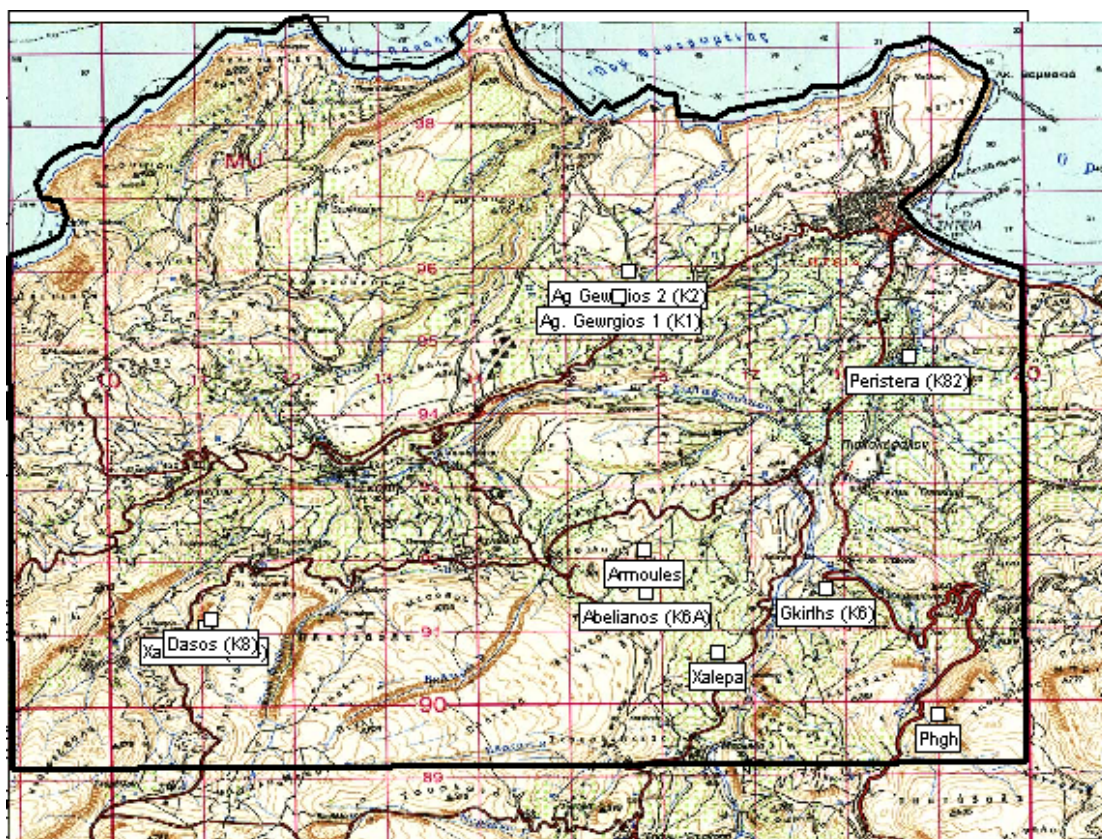
Οι γεωτρήσεις με τις οποίες ασχοληθήκαμε καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους δίνονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα. Πιο λεπτομερής περιγραφή των στοιχείων κάθε γεώτρησης ακολουθεί παρακάτω στην ενότητα αυτή.

A/A	Τοποθεσία Γεώτρησης	Βάθος Γεώτρησης(m)	Εκτιμώμενη Παροχή (m³/h)
1	Άγ. Γεώργιος (1)	148	45
2	Άγ. Γεώργιος (2)	132	70
3	Περιστερά	106,40	70
4	Αρμούλες	190,5	60
5	Αβελιακός	221	50
6	Γκιρλής	106,40	30
7	Χαλέπα	141,96	30

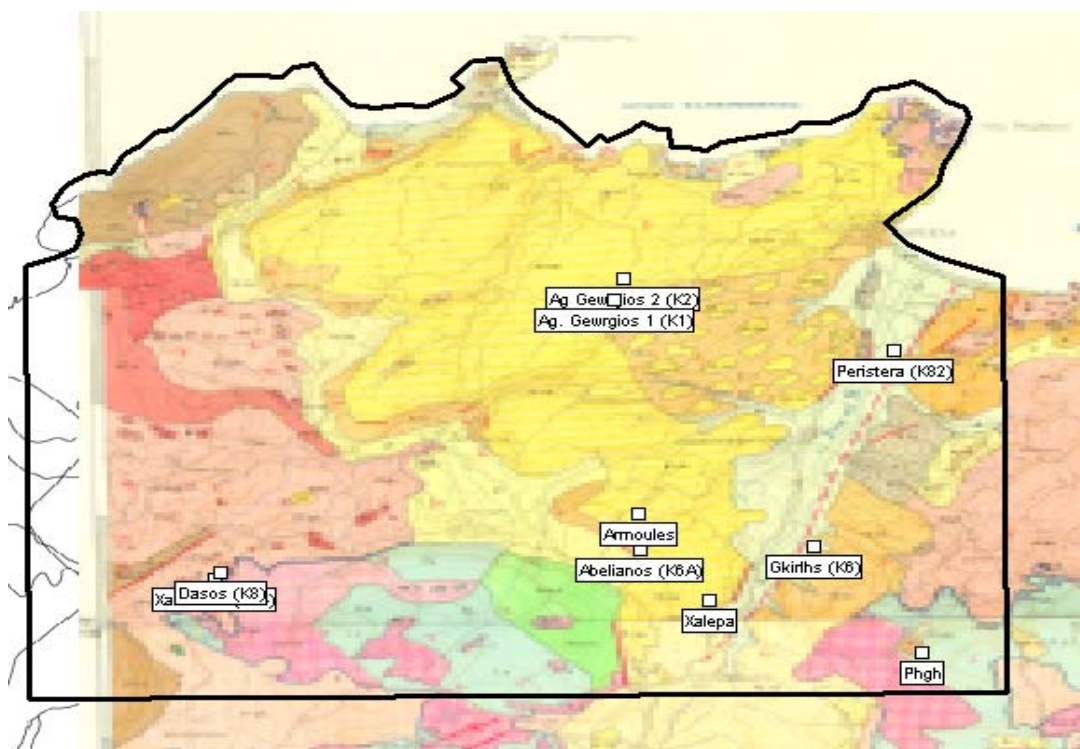
8	Δάσος	340	65
9	Χαμέζι	340	65

Η ακριβής περιοχή μελέτης όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή είναι η περιοχή δυτικά της πόλης της Σητείας και εκτείνεται μέχρι μερικά χιλιόμετρα δυτικότερα του οικισμού Χαμέζιον. Στα νότια εκτείνεται μέχρι την περιοχή που οριοθετείται από τα όρη Κοπροκέφαλο και Πλατύβολο, ενώ ανατολικά εκτείνεται μέχρι την περιοχή της Περιστεράς και των οικισμών Άνω Δρυς και Κάτω Δρυς.

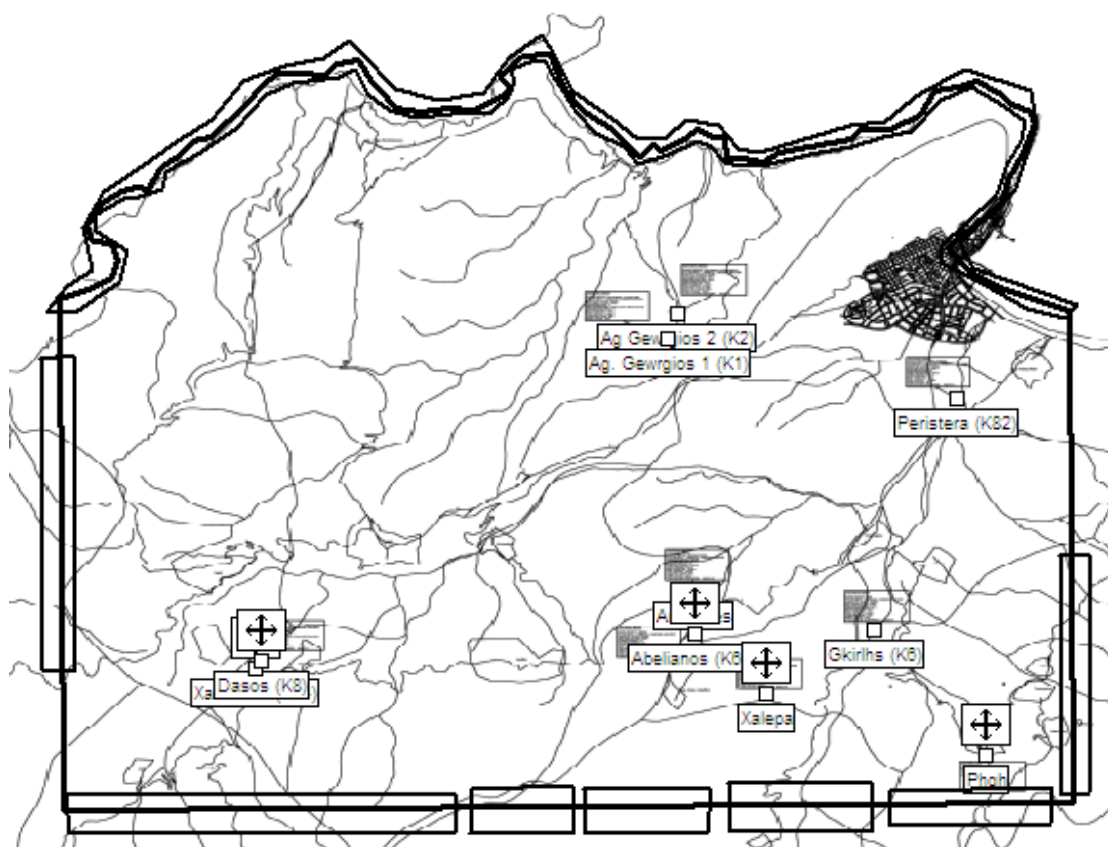
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες που εισήχθησαν στο μοντέλο και με την επεξεργασία των οποίων λάβαμε τα αντιστοιχα αποτελέσματα:



Σχήμα 6.2 Γεωγραφικός-Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης και τις γεωτρήσεις.



Σχήμα 6.3 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης και τις γεωτρήσεις. Φαίνεται καθαρά η ορυκτολογική σύσταση της περιοχής.



Σχήμα 6.4 Υδρολογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης, τις γεωτρήσεις καθώς και τις οριακές συνθήκες 2^ο είδους.

Κατά την επεξεργασία του γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης οριοθετήσαμε τα πετρώματα με κλειστές γραμμές ούτως ώστε να φανούν ξεκάθαρα αυτά από τα οποία απαρτίζεται.

Τα πετρώματα που υπάρχουν είναι κυρίως Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα στο χάρτη. Παρατηρώντας τον βλέπουμε μάλιστα ότι το πέτρωμα αυτό εκτείνεται και στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης. Στην υπόλοιπη περιοχή έχουμε ποικιλία πετρωμάτων τα επικρατέστερα από τα οποία είναι: πλακώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι που παρουσιάζονται με καφέ χρώμα , διάφορων ειδών ασβεστόλιθοι οι οποίοι φαίνονται με το έντονο κόκκινο, το πράσινο και το γαλάζιο χρώμα, φυλλίτες που φαίνονται με το ανοιχτό ροζ, δολομίτες τεφροί με σκούρο ροζ, σύγχρονες προσχώσεις με ανοιχτό γκρι και μάργες υποπράσινες με πορτοκαλί χρώμα.

Η τελική μορφή λοιπόν του γεωλογικού χάρτη της περιοχής έτσι όπως την επεξεργάστηκε το μοντέλο είναι:

pl-m	Μάργες Θαλάσσιες	8,64
Mi	Θαλάσσιοι σχηματισμοί μη διαχωριζόμενοι (Μειόκαινο)	8,64
Mi-mk	Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	86,4
Mi-m	Μάργες υποπράσινες	69,12
Mi-ms	Μαργαϊκοί ψαμμίτες υποκίτρινοι	8,64
Mi-c2	Κροκαλοπαγή επικλύσεως της θάλασσας	0,0864
Kr.o-k	Ασβεστόλιθοι (σειράς Τριπολιτσάς)	4,32
J-K	Ασβεστόλιθοι (Ιουρασικό)	0,864
Ro-D	Δολομίτες	8,64
PT-k	Ασβεστόλιθοι (Περμοτριάδικό)	8,64
PT-ph-a	Εκρηξιγενή	8,64
PT-ph-c	Φυλλίτες	8,64
PT-ph	Φυλλίτες	8,64
CP-k	Πλακώδεις Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι	8,64

Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας όπως βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία και από πληροφορίες των γεωλόγων της περιοχής για διάφορα ομάδες πετρωμάτων είναι:

Πέτρωμα	Εκτιμώμενη Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθοι- Δολομίτες	12,96
Βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστολιθοι	5,2
Μάργες-Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0,15
Άργιλος	0,6048
Άμμος-Θαλάσσιες αποθέσεις	430
Λατύπες ανθρακικής σύνθεσης	173,2

Στον υδρολογικό χάρτη της περιοχής του σχήματος (6.4) φαίνεται καθαρά η τοποθεσία της κάθε γεώτρησης. Σύμφωνα με αυτόν, μετά την εισαγωγή του στο μοντέλο, ορίσαμε την ακριβή θέση της κάθε γεώτρησης πάνω στην περιοχή μελέτης. Από τις πληροφορίες που μας δόθηκαν για την κάθε μία υπολογίστηκε το αρχικό

υδραυλικό τους ύψος και ανάλογα με το βάθος που φτάνουν αυτές και αντλούν νερό, χωρίσαμε την περιοχή από την επιφάνεια της θάλασσας και κάτω σε 3 στρώματα, όπως αναφέρεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Συνολικά οι γεωτρήσεις με τις οποίες ασχοληθήκαμε είναι 9 και αυτές αποτελούν τον βασικό τρόπο υδροδότησης της περιοχής. Οι πληροφορίες που πήραμε από το δήμο Σητείας και αναφέρονται πάνω στους ορθοφωτοχάρτες αναλυτικά για την κάθε γεώτρηση είναι:

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης
Ονομασία γεώτρησης: Μάναρη- Περιστεράς
Συντεταγμένες θέσης: X= 691627,161 Y= 3896288,854 H= 10,17 ΕΓΣΑ '87
Ημερομηνία ανόρυξης: 13-07-1973
Ολικό βάθος διάτρησης: 106,40m
Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"
Ολικό μήκος σωλήνωσης: 111,11m
Διάμετρος σωλήνων στήλης: 6"
Βάθος τοποθέτησης: 70,40m
Παροχή γεώτρησης: 70m ³ /hr.
Υδροστατική στάθμη: 9,72m
Στάθμη άντλησης: 48m
Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P83/8- 70HP

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης

Ονομασία γεώτρησης: Αρμούλες- Σταυρακάκη

Συντεταγμένες θέσης: X=688826,560 Y=3893939,280 H= 176,93 ΕΓΣΑ '87

Ημερομηνία ανόρυξης: 11-05-1990

Ολικό βάθος διάτρησης: 190,50m

Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"

Ολικό μήκος σωλήνωσης: 140m

Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5"

Βάθος τοποθέτησης: 130-136m

Παροχή γεώτρησης: 60m³/hr.

Υδροστατική στάθμη: 86,30m

Στάθμη άντλησης: 92,10m

Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P81/11- 60HP

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης

Ονομασία γεώτρησης: Γκιρλής

Συντεταγμένες θέσης: X= 690783,535 Y= 3893396,533 H= 45,22 ΕΓΣΑ '87

Ημερομηνία ανόρυξης: 13-07-1973

Ολικό βάθος διάτρησης: 106,40m

Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"

Ολικό μήκος σωλήνωσης: 111,11m

Διάμετρος σωλήνων στήλης: 6"

Βάθος τοποθέτησης: 70,40m

Παροχή γεώτρησης: 70m³/hr.

Υδροστατική στάθμη: 9,72m

Στάθμη άντλησης: 48m

Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: N84/10- 70HP

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης

Ονομασία γεώτρησης: Χαλέπα

Συντεταγμένες θέσης: X= 689621,353 Y= 3892598,326 H= 141,96 ΕΓΣΑ '87
--

Ημερομηνία ανόρυξης: 01-03-1995

Ολικό βάθος διάτρησης: 245m

Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"

Ολικό μήκος σωλήνωσης: 140m

Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5"

Βάθος τοποθέτησης: 180m

Παροχή γεώτρησης: 30m ³ /hr.

Υδροστατική στάθμη: 76,10m

Στάθμη άντλησης: 101m

Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: N85/20- 50HP
--

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης

Ονομασία γεώτρησης: Αβελιακός

Συντεταγμένες θέσης: X=688827,359 Y=3893378,529 H=204,06 ΕΓΣΑ '87

Ημερομηνία ανόρυξης: 25-07-1991

Ολικό βάθος διάτρησης: 221m

Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"

Ολικό μήκος σωλήνωσης: 172m

Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5"

Βάθος τοποθέτησης: 172m

Παροχή γεώτρησης: 50m ³ /hr.

Υδροστατική στάθμη: 102,10m

Στάθμη άντλησης: 120m

Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P81/11- 60HP
--

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης
Ονομασία γεώτρησης: Αγ. Γεώργιος-Νταουσός 1 (Μικρή) Συντεταγμένες θέσης: X= 688543,100 Y= 3897014,740 H= 89,12 ΕΓΣΑ '87 Ημερομηνία ανόρυξης: 06-09-1979 Ολικό βάθος διάτρησης: 148m Διάμετρος σωλήνωσης: 8” Ολικό μήκος σωλήνωσης: 150,41m (19 τεμάχια τυφλά, 6 τεμάχια φίλτρα) Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5” Βάθος τοποθέτησης: 104m Παροχή γεώτρησης: 45m ³ /hr. Υδροστατική στάθμη: 86,54m Στάθμη άντλησης: 97,66m Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P81/10- 50HP

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης
Ονομασία γεώτρησης: Αγ. Γεώργιος-Νταουσός 2 (Μεγάλη) Συντεταγμένες θέσης: X= 688652,435 Y= 3897332,839 H= 106,7 ΕΓΣΑ '87 Ημερομηνία ανόρυξης: 03-06-1986 Ολικό βάθος διάτρησης: 132m Διάμετρος σωλήνωσης: 8” Ολικό μήκος σωλήνωσης: 140m Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5” Βάθος τοποθέτησης: 125m Παροχή γεώτρησης: 70m ³ /hr. Υδροστατική στάθμη: 105,30m Στάθμη άντλησης: 111,25m Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P81/11- 60HP

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης
<p>Ονομασία γεώτρησης: Πηνί-Δάσος-Παρασπόρι</p> <p>Συντεταγμένες θέσης: X= 684120,703 Y= 3892958,522 H= 263,54 ΕΓΣΑ '87</p> <p>Ημερομηνία ανόρυξης: 10-10-1990</p> <p>Ολικό βάθος διάτρησης: 340m</p> <p>Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"</p> <p>Ολικό μήκος σωλήνωσης: 150,41m</p> <p>Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5"</p> <p>Βάθος τοποθέτησης: 104m</p> <p>Παροχή γεώτρησης: 65m³/hr.</p> <p>Υδροστατική στάθμη: 260,20m</p> <p>Στάθμη άντλησης: 263,12m</p> <p>Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P83/8- 75HP</p>

Χαρακτηριστικά Γεώτρησης
<p>Ονομασία γεώτρησης: Πηνί-Δάσος-Χαμέζιον</p> <p>Συντεταγμένες θέσης: X= 684175,338 Y= 3893043,388 H= 257,85 ΕΓΣΑ '87</p> <p>Ημερομηνία ανόρυξης: 10-10-1990</p> <p>Ολικό βάθος διάτρησης: 340m</p> <p>Διάμετρος σωλήνωσης: 8,5"</p> <p>Ολικό μήκος σωλήνωσης: 150,41m (19 τεμάχια τυφλά, 6 τεμάχια φίλτρα)</p> <p>Διάμετρος σωλήνων στήλης: 5"</p> <p>Βάθος τοποθέτησης: 104m</p> <p>Παροχή γεώτρησης: 65m³/hr.</p> <p>Υδροστατική στάθμη: 260,20m</p> <p>Στάθμη άντλησης: 263,12m</p> <p>Τύπος αντλητικού συγκροτήματος: P83/8- 75HP</p>

Πηγή Ζου
Συντεταγμένες θέσης στη χαρτογραφική προβολή ΕΓΣΑ '87: X= 691921,140 Y= 3891900,819 H= 173,30

Στο παράρτημα παρατίθενται οι ορθοφωτοχάρτες όπως μας δόθηκαν από το Υπουργείο Γεωργίας (τμήμα Τοπογραφικής) για το δήμο Σητείας, στους οποίους διακρίνονται οι γεωτρήσεις πάνω στην περιοχή και η σχετική θέση μεταξύ τους.

6.3 Οριακές συνθήκες

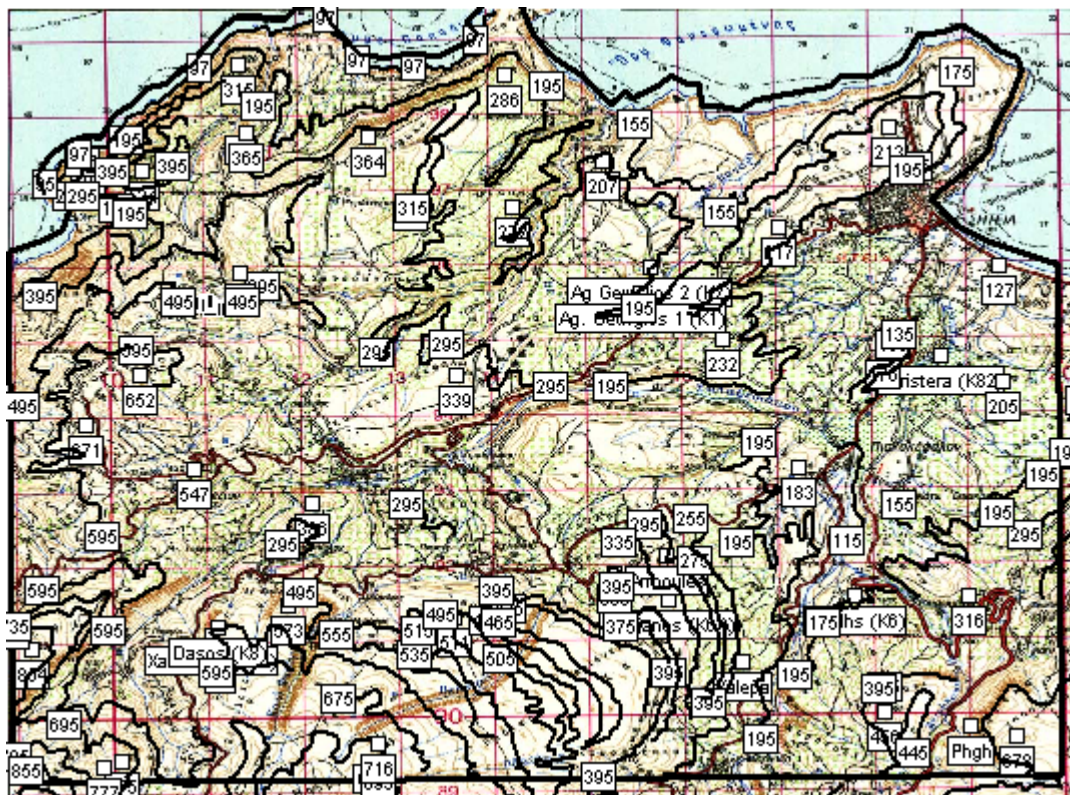
Από τον υδρολογικό χάρτη επίσης αντλούμε πληροφορίες για τις οριακές συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο. Κατά μήκος της ακτής στο τέταρτο στρώμα έχουμε οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους όπου το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό και ισούται με 95m όσο δηλαδή και το ύψος της θάλασσας στο σημείο αυτό. Αντίθετα στο πρώτο, στο δεύτερο και στο τρίτο στρώμα έχουμε ορίσει κατά μήκος της ακτής οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους όπου το υδραυλικό ύψος είναι 0. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί το νερό να διαφύγει λόγω του ότι συναντάει το θαλασσινό νερό, το οποίο το εμποδίζει. Από τα υδατοπερατά πετρώματα της περιοχής μελέτης γίνεται εισροή νερού από τον υπόγειο υδροφόρα προς την περιοχή μελέτης, γι' αυτό στα πετρώματα αυτά έχουν εισαχθεί οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους με σταθερές τιμές ανά μονάδα χρόνου. Οι συνθήκες ροής δηλαδή που ορίζουμε στο μοντέλο κάνουν τα αποτελέσματά μας πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας και επομένως γίνεται καλύτερη προσομοίωση της ροής. Οι τιμές αυτές έχουν διαφοροποιηθεί ανάλογα με τη χρονική περίοδο στην οποία αναφέρονται, καθώς το χειμώνα (μήνες Νοέμβριο μέχρι Μάρτιο) αναμένεται μεγαλύτερη εισροή νερού λόγω αυξημένων βροχοπτώσεων, μικρότερων τιμών άντλησης καθώς και λιώσιμο των χιονιών από τα βουνά. Αντίθετα κατά την θερινή περίοδο (μήνες Απρίλιο μέχρι Οκτώβριο) οι τιμές αυτές έχουν μειωθεί κατά 25-50%.

Επίσης τα πηγάδια άντλησης της περιοχής αποτελούν συνθήκες 2^{ου} είδους, μόνο που οι παροχές άντλησης έχουν προσαρμοστεί ανάλογα με την περίοδο προσομοίωσης. Ο

χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε δύο περιόδους, τη χειμερινή (150 ημέρες) και τη θερινή (210 ημέρες). Αυτό γίνεται για να έχουμε πιο αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Αν λάβουμε μάλιστα υπόψη το γεγονός ότι η περιοχή είναι τουριστική με αποτέλεσμα το καλοκαίρι οι κάτοικοι να αυξάνονται, καταλαβαίνουμε ότι τότε θα έχουμε και μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό. Αντίθετα το χειμώνα οι ανάγκες υδροδότησης της περιοχής είναι πολύ λιγότερες γι' αυτό και οι παροχές άντλησης είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές της θερινής περιόδου.

6.4 Υψόμετρο-Αρτικές συνθήκες

Από τον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής δόθηκαν στο μοντέλο τα υψομετρικά της στοιχεία (ισοϋψείς και σημειακά υψόμετρα) και με παρεμβολή δημιουργήθηκε το ανάγλυφό της. Στην τιμή των υψομέτρων που δόθηκαν από το χάρτη προσθέσαμε 95 μέτρα, καθώς το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται στα 95 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο χάρτης που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 6.6 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με χαραγμένες τις ισοϋψείς και τα σημειακά υψόμετρα. Οι τιμές των υψομέτρων είναι σε μέτρα.

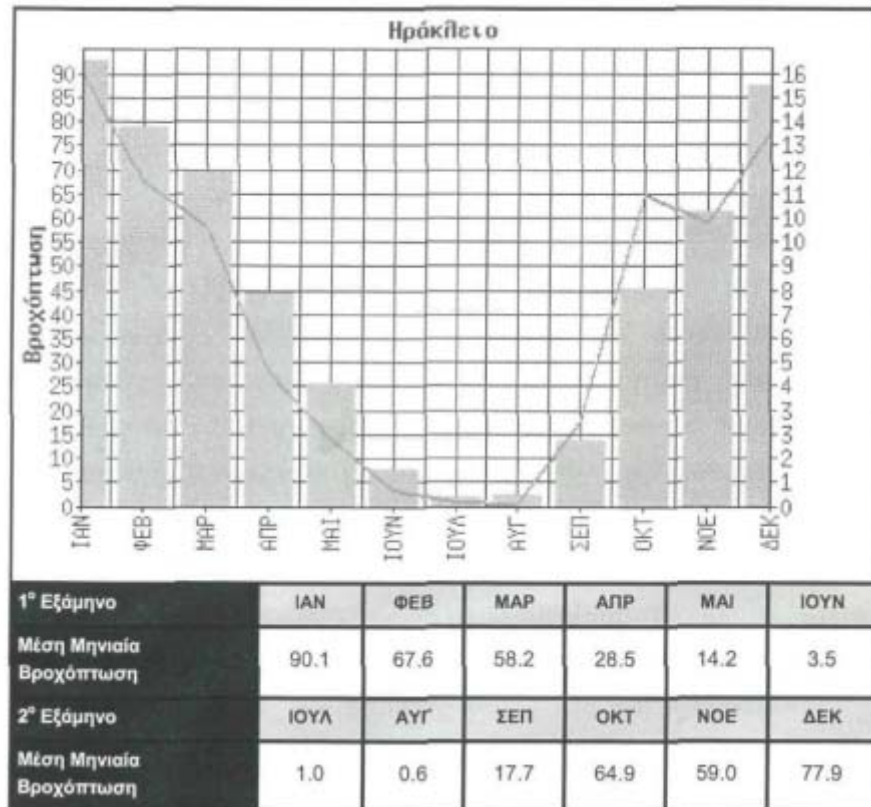
Το έδαφος κάτω από την περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 3 στρώματα. Τα στρώματα αυτά είχαν συνολικό βάθος 95 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό έγινε με βάση τις πληροφορίες για το υψόμετρο, το βάθος και την υδροστατική στάθμη της κάθε γεώτρησης.

Στο μοντέλο λοιπόν εισήχθηκαν συνολικά 4 στρώματα, 3 κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, όπως αναφέρθηκε, και ένα από εκεί και πάνω (επιφανειακό στρώμα). Το πάχος του πρώτου στρώματος ορίστηκε ότι είναι 45m και από αυτό αντλούν οι γεωτρήσεις Χαλέπα, Αβελιακός, Δάσος και Χαμέζι, του δεύτερου στρώματος ορίστηκε στα 40m απ' το οποίο αντλεί η γεώτρηση του Αγ. Γεωργίου (2). Τέλος το πάχος του τρίτου στρώματος είναι 10m και οι γεωτρήσεις που αντλούν από αυτό είναι του Αγ. Γεωργίου (1) και της Περιστεράς. Το επιφανειακό στρώμα έχει πάχος από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και το ψηλότερο σημείο της περιοχής μελέτης και απ' αυτό αντλούν οι γεωτρήσεις Γκιρλής και Αρμούλες.

Ακόμη, για να μπορέσει το μοντέλο να κάνει προσομοίωση της περιοχής και να δώσει μια κατάσταση του υδροφορέα χρειάζεται κάποιες αρχικές συνθήκες, όπως το αρχικό υδραυλικό ύψος. Η τιμή αυτή δόθηκε στα 95μέτρα, ίση δηλαδή με το επίπεδο της θάλασσας.

6.5 Βροχόπτωση

Από τα στοιχεία του Μετεωρολογικού σταθμού του Ηρακλείου προκύπτει ότι το ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης ανέρχεται στα 490mm βροχής.



Πηγή: Ε.Μ.Υ., 2004

Η περίοδος των βροχοπτώσεων κυμαίνεται κυρίως την χειμερινή περίοδο (Νοέμβριο μέχρι Μάρτιο), ενώ η θερινή περίοδος (Απρίλιο μέχρι Οκτώβριο) εμφανίζεται σχεδόν ξηρή. Η βροχόπτωση επηρεάζει άμεσα τα υπόγεια ύδατα καθώς, όπως είδαμε και στον κύκλο του νερού, το νερό της βροχής καταλήγει στους υδροφορείς με τη διεργασία της διήθησης. Γι' αυτό εισάγουμε στο μοντέλο κατά τη χειμερινή περίοδο έναν επιπλέον όρο ο οποίος αντιπροσωπεύει τη βροχόπτωση, καθώς τότε το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο.

Αναφέραμε και παραπάνω ότι το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο νομό Λασιθίου ανέρχεται στα 490mm/yr. Εάν ολόκληρο το ποσό της βροχής διηθούνταν, θα είχαμε εισροή ύδατος στον υπόγειο υδροφόρα:

$$490\text{mm/year} \times (10^{-3}\text{m}/180\text{days}) = 0,00272\text{m/d.}$$

Για τη μετατροπή του year σε day χρησιμοποιούμε τη χρονική διάρκεια μόνο της χειμερινής περιόδου, κατά την οποία συμβαίνει και το φαινόμενο των βροχοπτώσεων και η οποία έχει διάρκεια 180ημέρες. Θεωρούμε όμως ότι μόνο το 25% της

βροχόπτωσης διηθείται τελικά και εισέρχεται στον υπόγειο υδροφορέα, επομένως το τελικό σύνολο της διήθησης που εισάγεται στο μοντέλο είναι:

$$0,25 \times 0,00272 \text{ m/d} = 0,00068 \text{ m/d}.$$

6.6 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των στοιχείων στο μοντέλο, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του ούτως ώστε να μην προκύψουν λάθη κατά τη διεξαγωγή των σεναρίων. Η βαθμονόμηση ήταν μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία καθώς τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας δεν ήταν αρκετά για τον ακριβή καθορισμό της ζώνης υφαλμύρισης. Μετά την επιλογή των κατάλληλων οριακών και αρχικών συνθηκών, προσδιορίστηκε η αρχική ζώνη υφαλμύρισης.

Ο χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί σε δύο περιόδους, την χειμερινή και τη θερινή, οι οποίες διαρκούν 5 και 7 μήνες αντίστοιχα. Ο υδροφορέας της περιοχής χρειάζεται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να έρθει σε «σταθερές» συνθήκες (steady states), σύμφωνα με τις δεδομένες συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο. Αυτός ο χρόνος υπολογίστηκε ότι είναι 360 μέρες, γι αυτό και όλα τα μελλοντικά σενάρια που θα γίνουν θα έχουν ως βάση τους τον 1 χρόνο (= 360 μέρες).

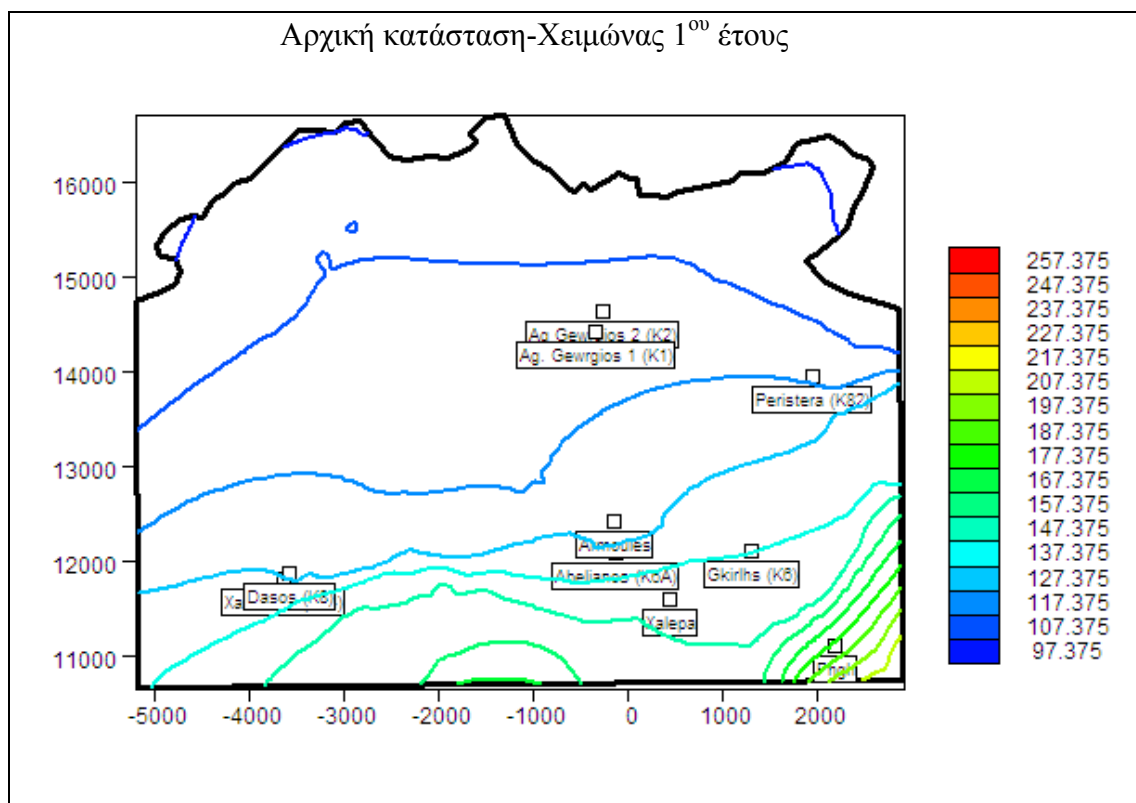
Σύμφωνα με την εξίσωση Ghyben-Herzberg, η μέγιστη στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 φορές περίπου τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Έχουμε δηλαδή τη σχέση: $h_s = 40h_f$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πάχος του υδροφορέα είναι 95m, επομένως το σημείο που θα εμφανίζεται το μέτωπο της υφαλμύρισης θα έχει υδραυλικό ύψος $95\text{m} + (95/49)\text{m} = 97,375\text{m}$. Όλα τα σημεία που έχουν μικρότερο υδραυλικό ύψος από αυτό θα βρίσκονται μέσα στη ζώνη υφαλμύρισης.

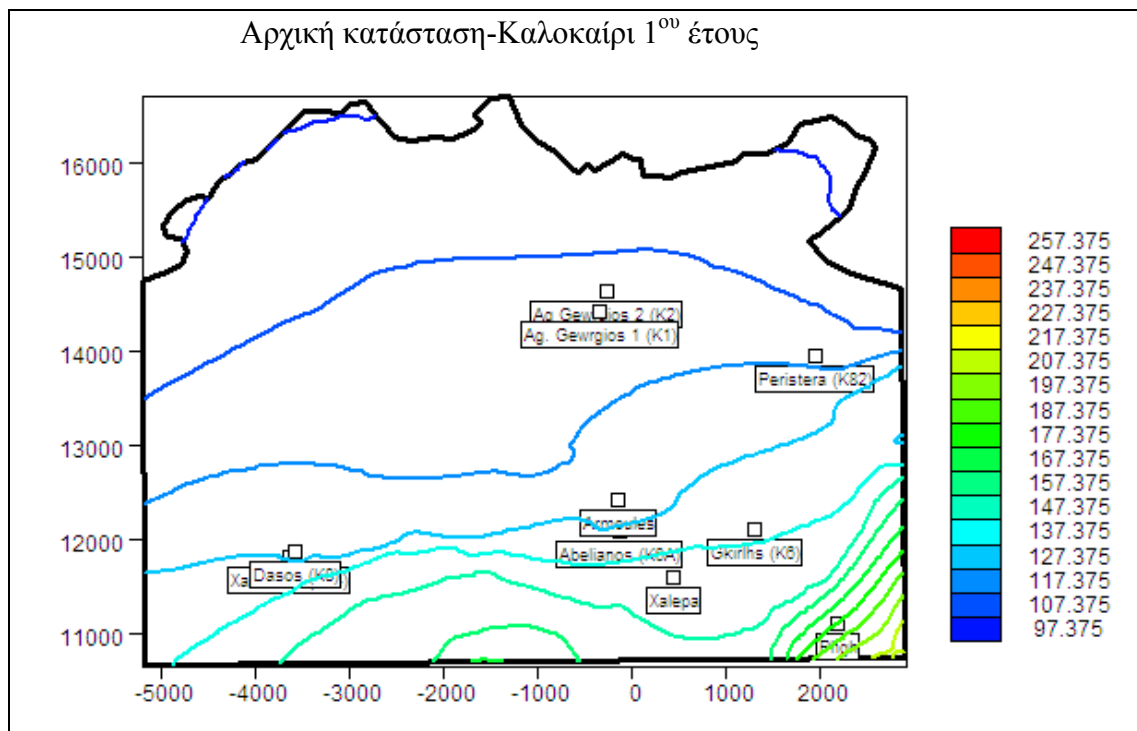
Στα διαγράμματα της αρχικής κατάστασης καθώς και των μελλοντικών σεναρίων, οι ισοδυναμικές γραμμές του υδραυλικού ύψους παρουσιάζονται με κλίμακα που αρχίζει από τα 97,375m (μέτωπο της υφαλμύρισης) και με σταθερό βήμα τα 10m, καταλήγει στα 257,375m. Στα διαγράμματα των ταχυτήτων δεν υπάρχει σταθερό βήμα και επομένως σε κάθε περίπτωση οι ταχύτητες είναι διαφορετικές και παρουσιάζονται στα αντιστοίχως.

6.7 Αρχική κατάσταση. Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα.

Μετά την εισαγωγή όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο PTC, και για χρονική διάρκεια 1 χρόνου, έγινε προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής. Μετά τη λήξη της χειμερινής και της θερινής περιόδου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:

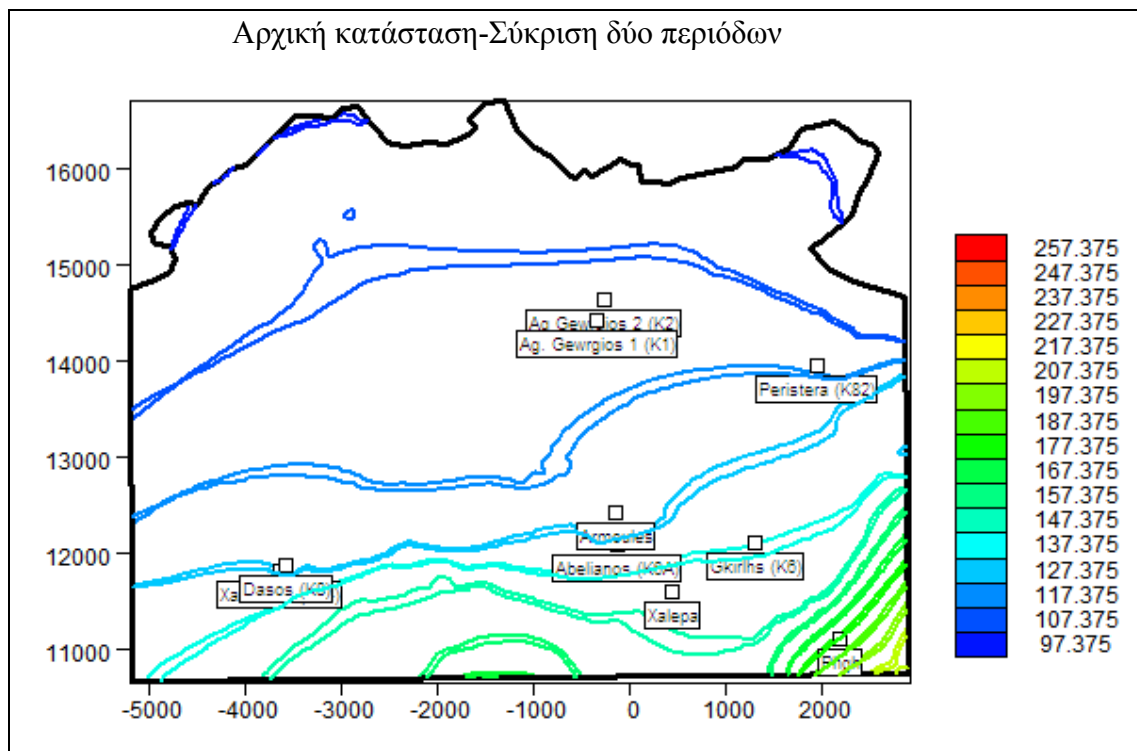


Σχήμα 6.7 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του πρώτου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 6.8 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του πρώτου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται προσομοίωση της αρχικής κατάστασης μετά το τέλος και των δύο περιόδων του 1^{ου} έτους. Φαίνονται καθαρά οι διαφορές στα υδραυλικά ύψη, καθώς αυτά κατά τη χειμερινή περίοδο αυξάνονται ενώ κατά τη θερινή είναι μειωμένα.



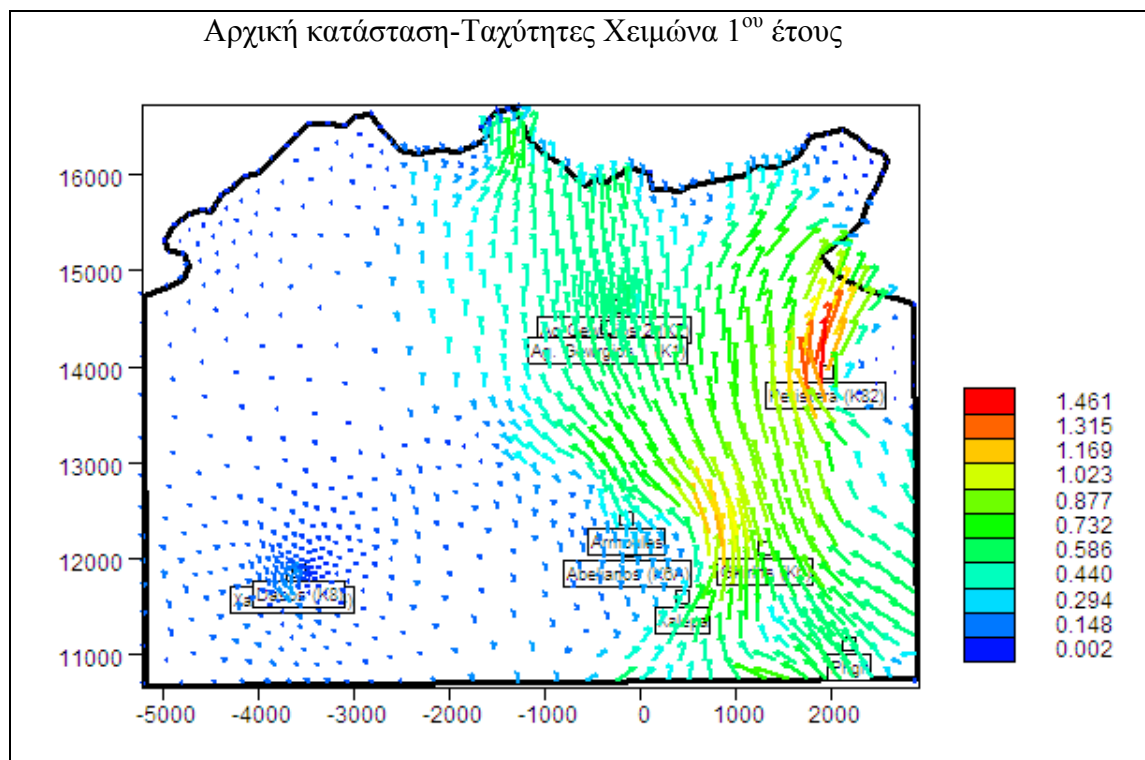
Σχήμα 6.9 Συγκριτική προσομοίωση του Υδραυλικού ύψους και για τις δύο περιόδους.

Όπως φαίνεται από τα σχήματα η παρούσα κατάσταση δεν είναι δυσμενής για τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. Το μέτωπο της υφαλμύρινης κατά τη χειμερινή περίοδο δεν έχει εισχωρήσει καθόλου στην ενδοχώρα, αντίθετα παραμένει πολύ κοντά στην ακτογραμμή και μάλιστα εντοπίζεται τοπικά μόνο στην Βορειοανατολική και Βορειοδυτική πλευρά της περιοχής μελέτης. Καμία από τις γεωτρήσεις που εξετάσαμε δεν βρίσκονται εντός της ζώνης αυτής, αντίθετα απέχουν κατά πολύ, γεγονός που σημαίνει ότι δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα ύπαρξης υφάλμυρου νερού. Τα επίπεδα του υδραυλικού ύψους είναι ελαφρά αυξημένα σε σχέση με αυτά της θερινής περιόδου καθώς έχουμε στο σύστημα παραπάνω εισροή νερού (βροχοπτώσεις, λιώσιμο χιονιών) και χαμηλότερες τιμές άντλησης. Το μέτωπο της υφαλμύρινης είναι ελαφρά μετατοπισμένο προς την ακτή σε σχέση με τις υπάρχουσες γεωτρήσεις.

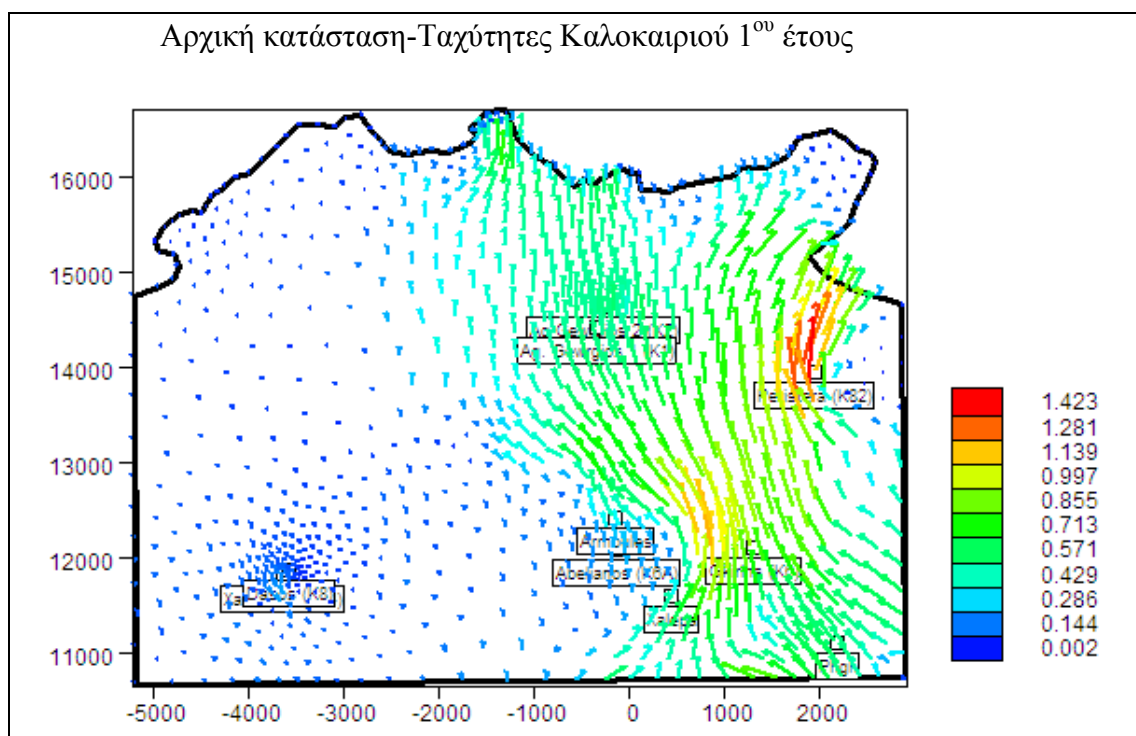
Το καλοκαίρι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κατάσταση διαφοροποιείται αλλά όχι σημαντικά. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι χαμηλότερες από αυτές της χειμερινής περιόδου, καθώς λόγω αυξημένων αναγκών οι γεωτρήσεις αντλούν με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς. Σ' αυτό συμβάλλει επίσης και η έλλειψη βροχοπτώσεων. Μια μικρή μετακίνηση του μετώπου της υφαλμύρινης προς την

ενδοχώρα δεν δημιουργεί προβλήματα στην ποιότητα του νερού των γεωτρήσεων καθώς η απόσταση μεταξύ τους κρίνεται ασφαλής.

Τα διαγράμματα των ταχυτήτων νερού για κάθε περίοδο είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 6.10 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του πρώτου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.



Σχήμα 6.11 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της θερινής περιόδου του πρώτου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

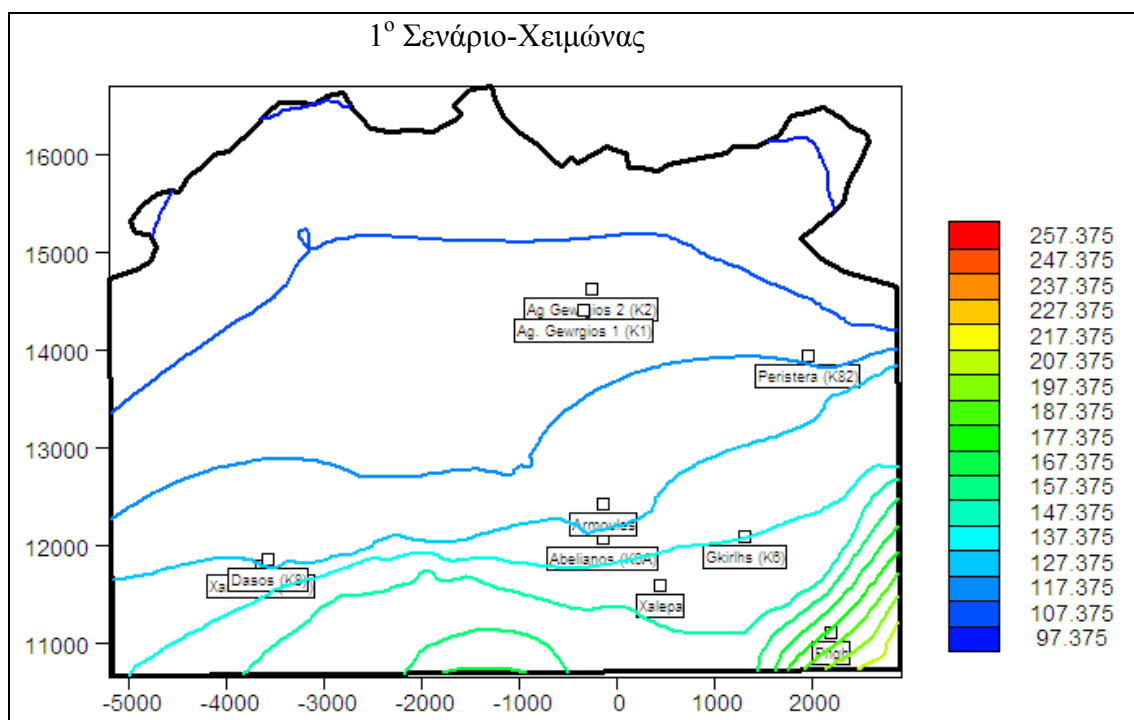
Η παρούσα κατάσταση όπως αναφέραμε και παραπάνω δεν επιφέρει προβλήματα στην περιοχή μας. Παρ' όλα αυτά θα γίνει μια προσέγγιση της μελλοντικής κατάστασης με τη χρήση σεναρίων, με σκοπό την πρόληψη και αντιμετώπιση καταστάσεων οι οποίες πιθανόν να επιβαρύνουν την περιοχή. Ως αρχικές συνθήκες για τα σενάρια, έχουν χρησιμοποιηθεί οι συνθήκες του υδροφορέα μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του 1^{ου} έτους, καθώς τότε ο υδροφορέας θα έχει έρθει σε συνθήκες σταθερής ροής (steady states). Ο χρόνος προσομοίωσης είναι επίσης 1 χρόνος (360 ημέρες).

6.8 Μελλοντικός προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης με τη χρήση σεναρίων.

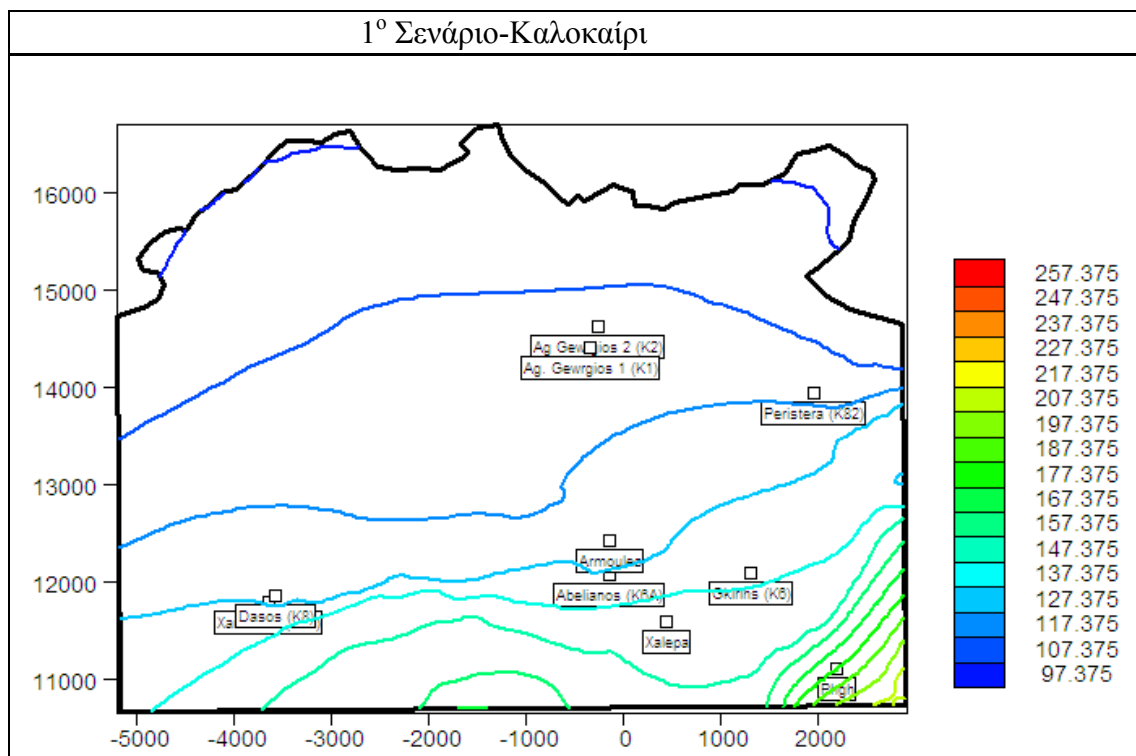
Για το μελλοντικό προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρινσης στην περιοχή της Σητείας του νομού Λασιθίου, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των σεναρίων. Έγινε μια εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης αρχικά με μείωση της άντλησης από τις γεωτρήσεις κατά 25% και έπειτα με αύξηση της άντλησης από τις γεωτρήσεις πάλι κατά 25%. Αναλυτικά τα αποτελέσματα είναι:

Σενάριο 1^ο:

Στο σενάριο αυτό προτείνεται η αύξηση της παροχής των 9 γεωτρήσεων κατά 25% της αρχικής τιμής τους. Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία του μοντέλου φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα:



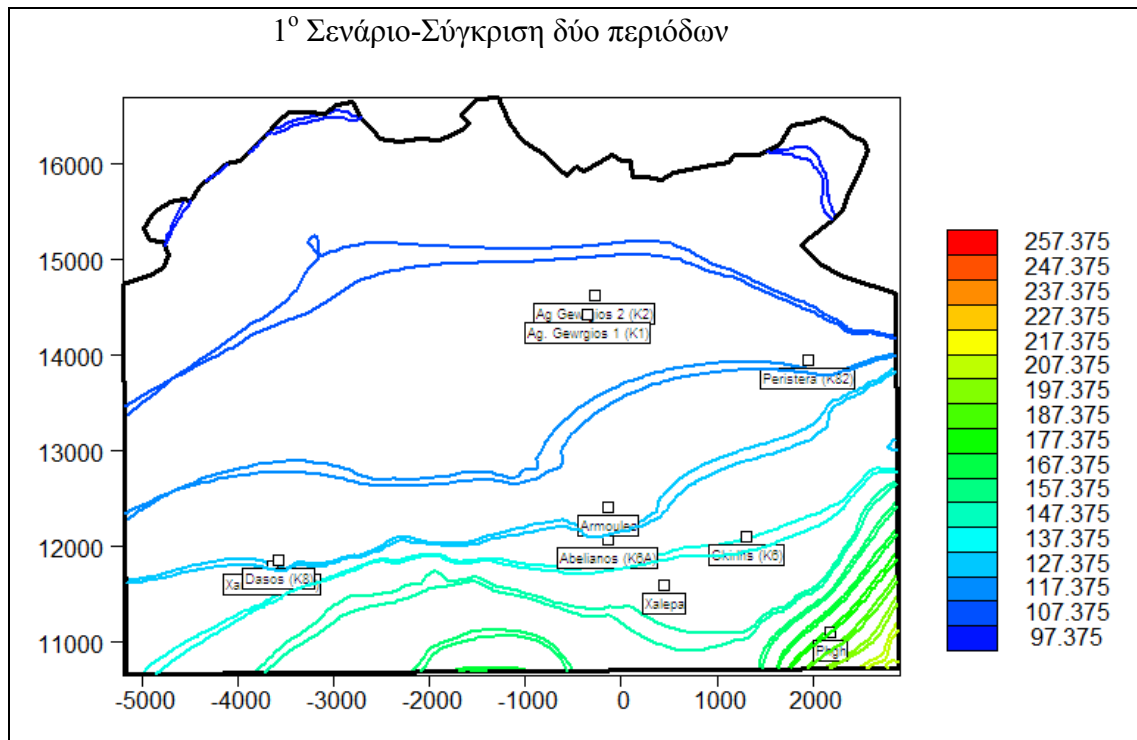
Σχήμα 6.12 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 6.13 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

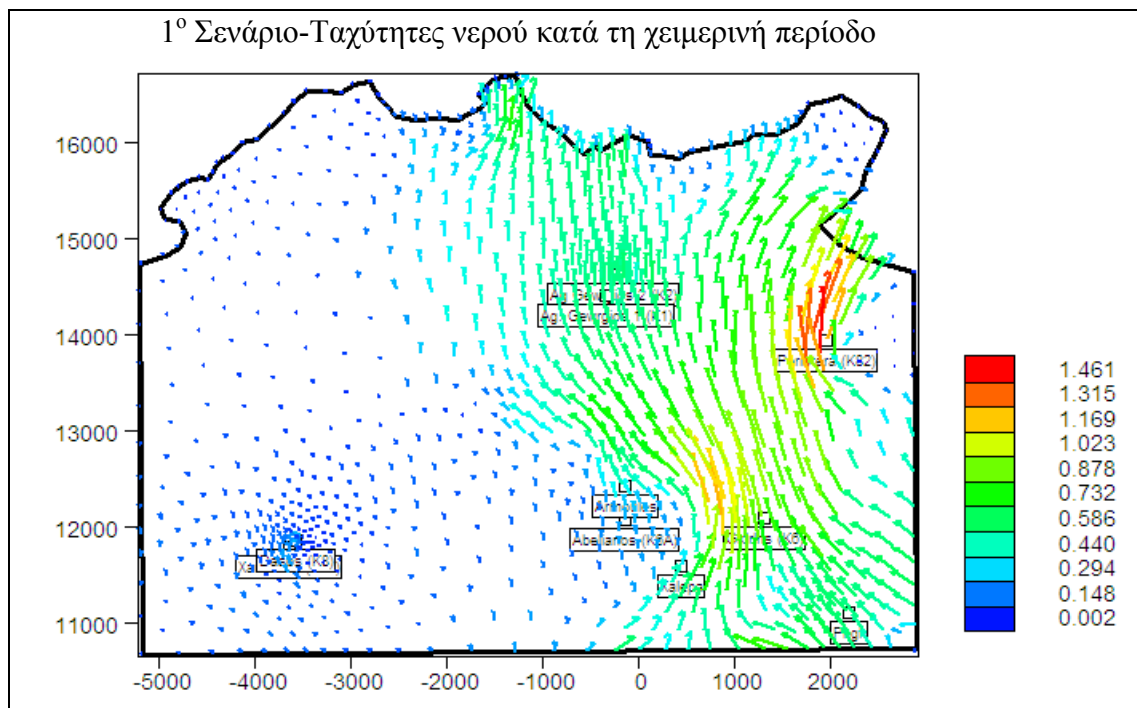
Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η κατάσταση δεν αλλάζει αισθητά. Και για τις δύο περιόδους (χειμερινή και θερινή) το μέτωπο της υφαλμύρωσης μετακινείται ελάχιστα, για τη θερινή περίοδο προς την ενδοχώρα και για την χειμερινή προς την ακτή, σε σχέση με αυτό της αρχικής κατάστασης. Επομένως οι γεωτρήσεις συνεχίζουν να παραμένουν εκτός της ζώνης υφαλμύρωσης, πράγμα που σημαίνει ότι δεν αντιμετωπίζουμε πρόβλημα στην ποιότητα του νερού. Επίσης τα υδραυλικά ύψη της περιοχής εμφανίζονται ελαφρώς μειωμένα σε σύγκριση με προηγούμενως. Μια επικείμενη αύξηση των παροχών κατά 25% λοιπόν δεν επιφέρει ιδιαίτερο πρόβλημα στην περιοχή μελέτης.

Το συγκριτικό διάγραμμα προσομοίωσης των δύο περιόδων για το 1^ο σενάριο είναι το ακόλουθο:

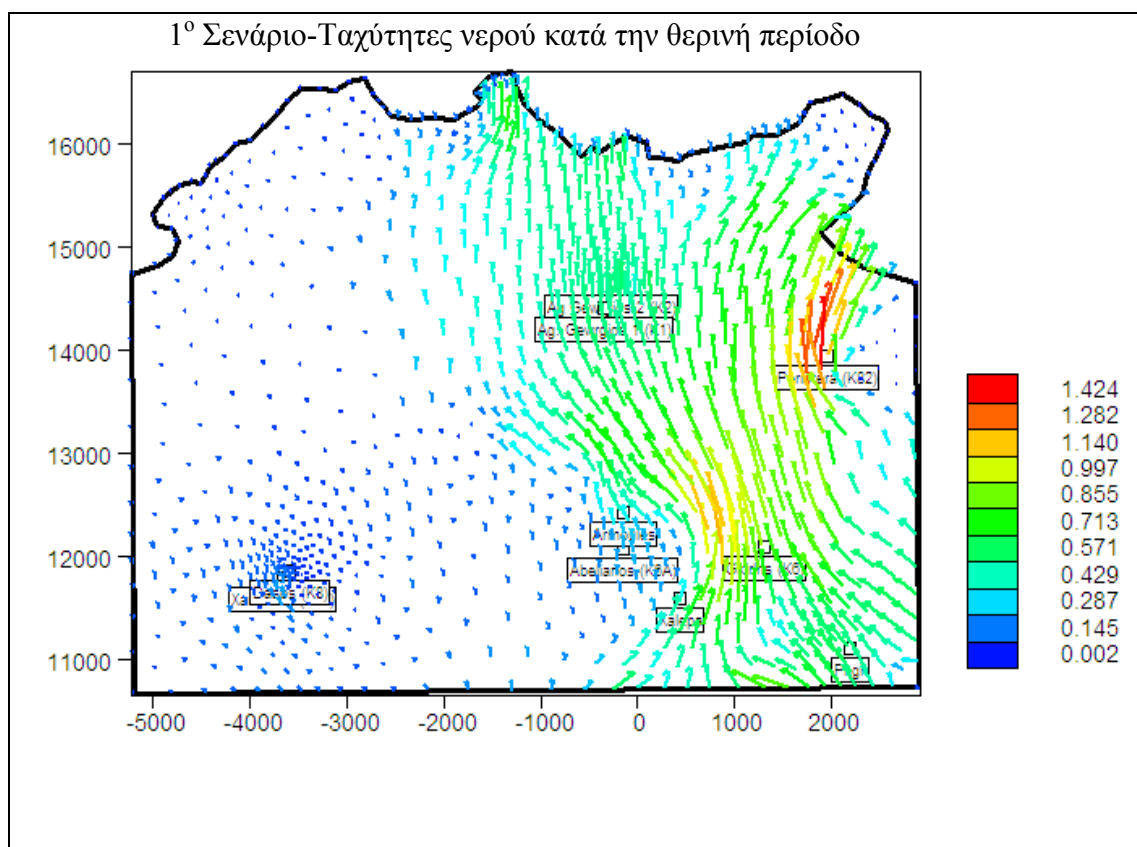


Σχήμα 6.14 Συγκριτική προσομοίωση των δύο περιόδων για το 1^ο Σενάριο

Από τα διαγράμματα των ταχυτήτων φαίνεται παρακάτω η τάση του νερού να διαφύγει από τα σημεία όπου υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα. Διακρίνουμε μάλιστα καθαρά την αλλαγή της πορείας του νερού προς αυτό το σκοπό.



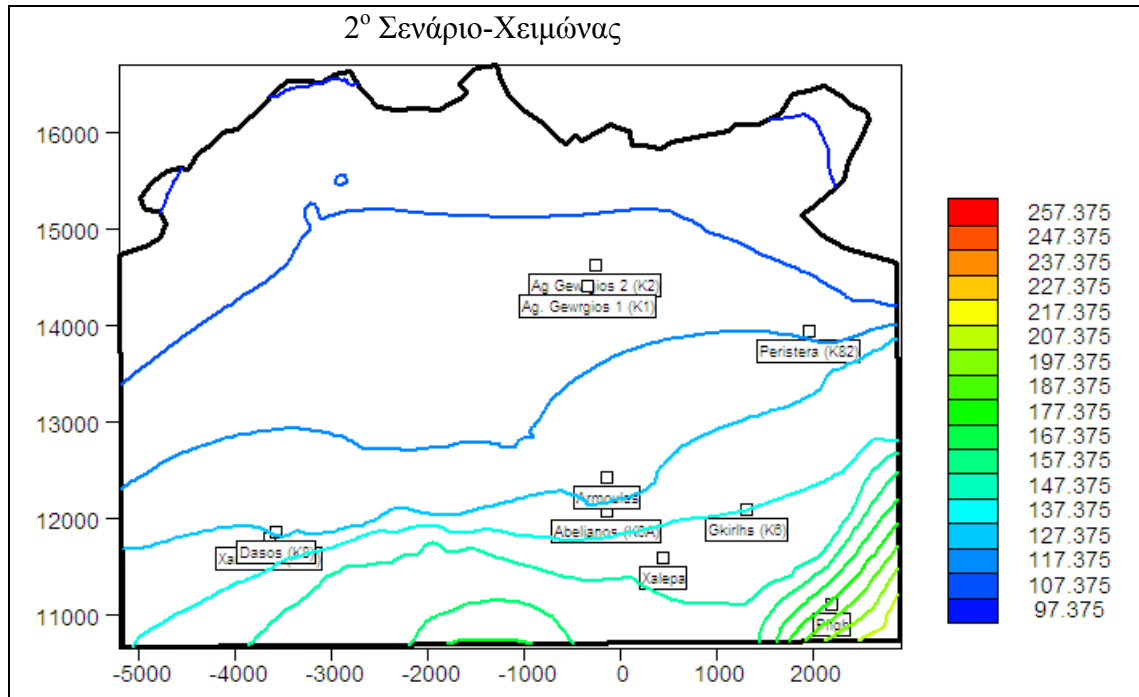
Σχήμα 6.15 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.



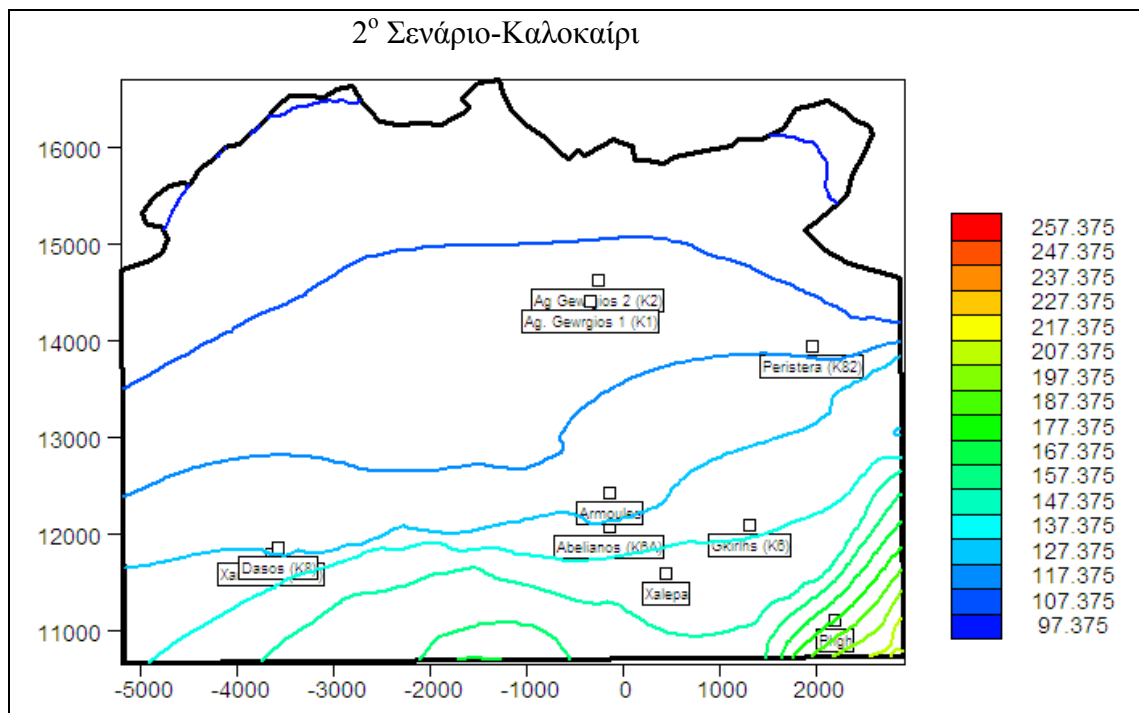
Σχήμα 6.16 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της θερινής περιόδου. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

Σενάριο 2^ο:

Στο δεύτερο σενάριο προβλέπεται μείωση των παροχών των γεωτρήσεων κατά 25% κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



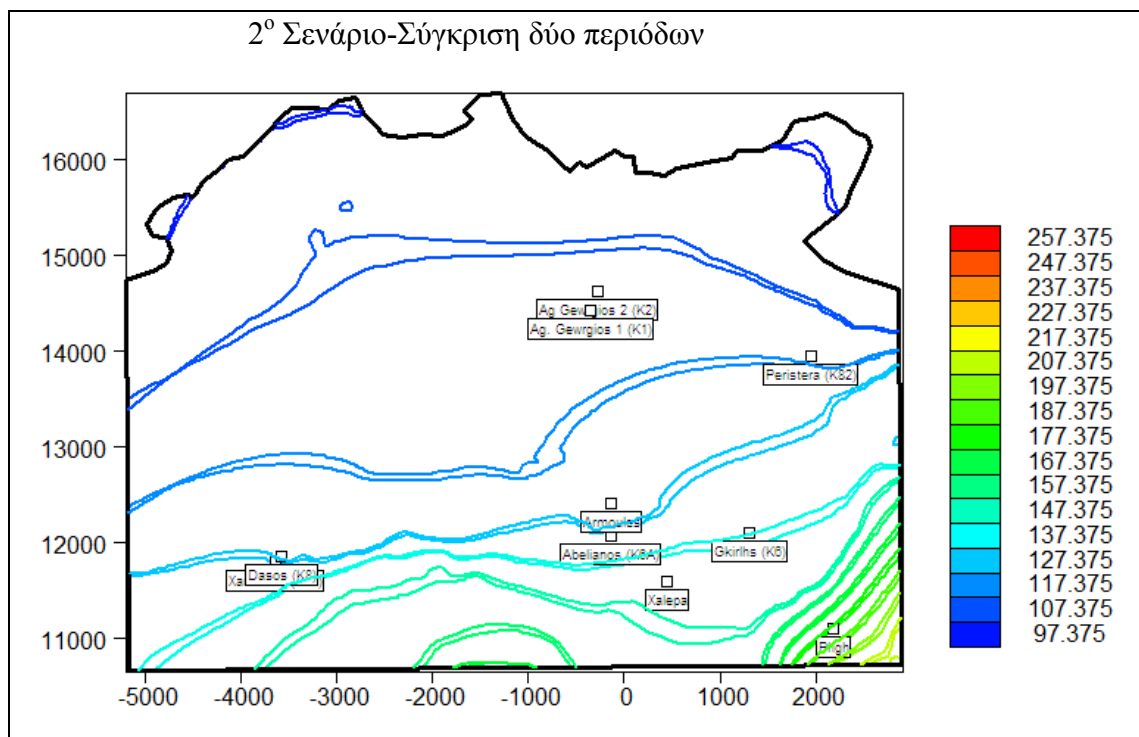
Σχήμα 6.17 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



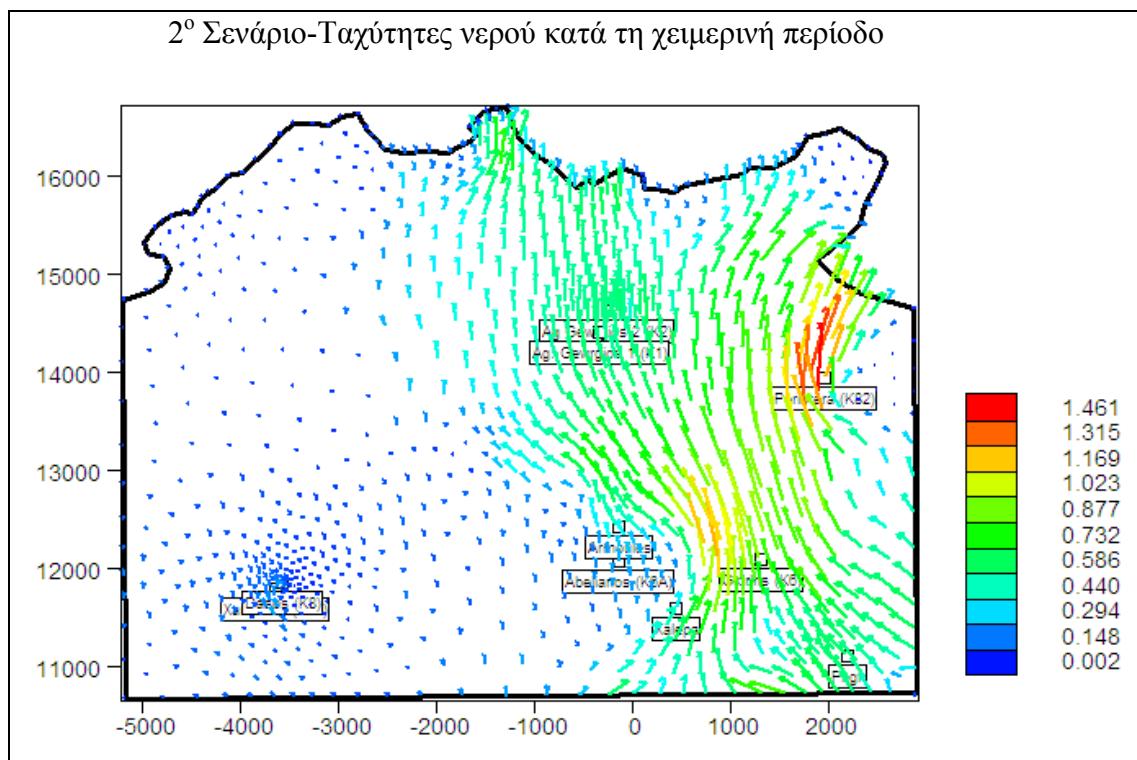
Σχήμα 6.18 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Συγκριτικά κι εδώ με την αρχική κατάσταση και το 1^ο σενάριο παρατηρούμε ότι το μέτωπο της υφαλμύρινης είναι ελαφρά μετατοπισμένο προς την ακτή για τη χειμερινή περίοδο και προς την ενδοχώρα για τη θερινή. Η μετατόπιση όμως του μετώπου της υφαλμύρινης σ' αυτό το σενάριο είναι αισθητά μικρότερη από την αντιστοιχία του 1^{ου} σεναρίου. Σε σχέση μάλιστα με την αρχική κατάσταση το μέτωπο της υφαλμύρινης μετακινείται ανεπαίσθητα. Τα υδραυλικά ύψη γενικά της περιοχής είναι κι αυτά αυξημένα σε σχέση με την αρχική κατάσταση και το 1^ο σενάριο, γεγονός εύλογο αν σκεφτούμε ότι μειώθηκαν οι παροχές άντλησης. Οι μεταβολές αυτές βέβαια δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να προκαλέσουν κάποια αξιολογή μετατροπή στην ήδη υπάρχουσα κατάσταση της περιοχής μελέτης. Τα υδραυλικά ύψη στις περιοχές που υπάρχουν ασβεστόλιθοι αυξάνονται αρκετά λόγω περισσότερων εισροών κατά το χειμώνα, αλλά στη συνέχεια περιορίζονται από τις μάργες που υπάρχουν στην περιοχή.

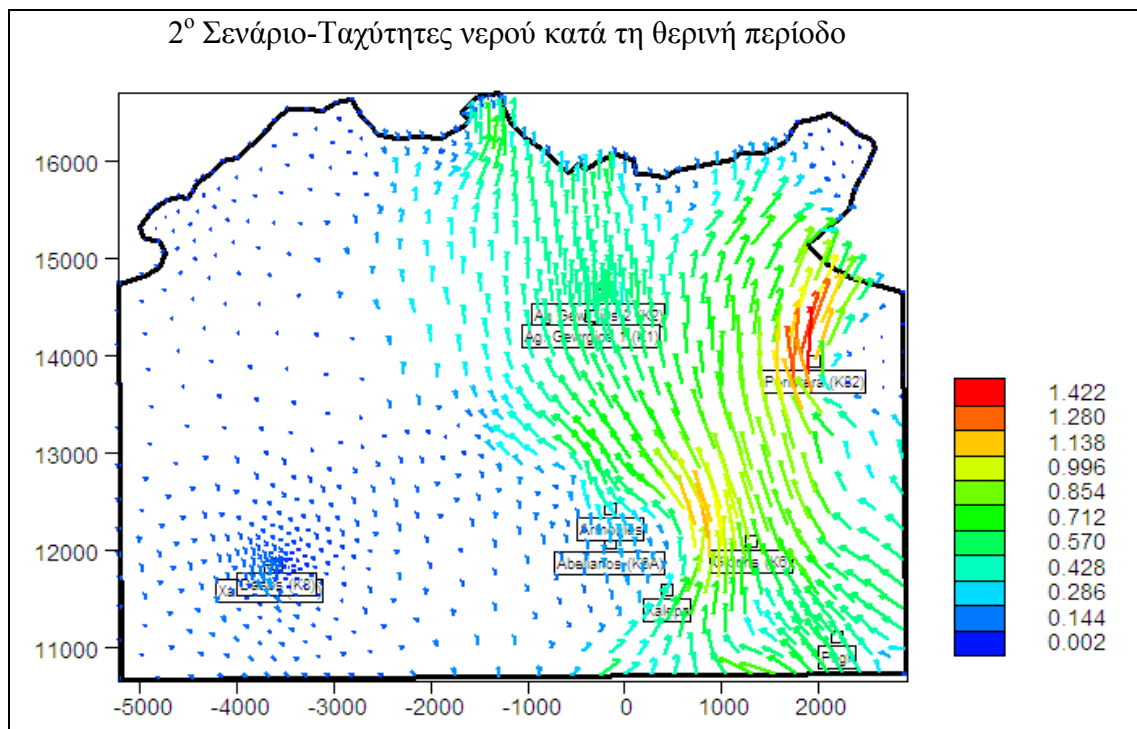
Το συγκριτικό διάγραμμα προσομοίωσης και για τις δύο περιόδους του σεναρίου αυτού είναι:



Το σενάριο αυτό λοιπόν είναι εφικτό να υλοποιηθεί καθώς δεν προκαλεί ιδιαίτερες μεταβολές την κατάσταση της περιοχής, αντιθέτως θα μπορούσαμε να πούμε βελτιώνει την ήδη υπάρχουσα κατάσταση, και συνεχίζει να καλύπτει τις βασικές ανάγκες ύδρευσης. Μ' αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να αποφευχθούν πιθανές μελλοντικές καταστάσεις εξάντλησης των αποθεμάτων ύδατος στην περιοχή, πράγμα πολύ σημαντικό για τη διατήρηση της ισορροπίας του περιβάλλοντος. Στα διαγράμματα των ταχυτήτων, τέλος, δεν παρουσιάζονται διαφορές. Αυτά είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 6.20 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Οι τιμές ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.



Σχήμα 6.21 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου. Οι τιμές ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

6.9 Συμπεράσματα-Προτάσεις

Η ευρύτερη περιοχή της Σητείας είναι μια αρκετά ανεπτυγμένη περιοχή σε θέματα τουρισμού, γι' αυτό και κατά τους θερινούς μήνες οι ανάγκες σε νερό είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διάνοιξη γεωτρήσεων για την εξυπηρέτηση των αναγκών της περιοχής σε νερό. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι η περιοχή δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα υφαλμύρινσης, πράγμα που οφείλεται προφανώς σε ορθολογιστική χρήση των γεωτρήσεων. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται επίσης και από τις πληροφορίες που αντλούμε από τον χάρτη προβολής των περιοχών με πρόβλημα υφαλμύρινσης, καθώς ο συγκεκριμένος δεν παρουσιάζει την ύπαρξη κινδύνου και προβλήματος γενικότερα για την περιοχή μελέτης μας. Κάποια προληπτικά μέτρα βέβαια είναι πάντα απαραίτητα για την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων καθώς και για την παρεμπόδιση εμφάνισής τους. Η ισορροπία στη διαχείριση των φυσικών πόρων είναι το σημαντικότερο για τη διατήρηση της καλής κατάστασης της περιοχής.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν λοιπόν από την παραπάνω μελέτη, καθώς και κάποιες προτάσεις βελτίωσης της κατάστασης είναι:

- ◆ Η αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη και επίπονη διαδικασία, καθώς είναι ένα φυσικό φαινόμενο δύσκολα αναστρέψιμο. Η αντιμετώπισή του μόνο δεν αρκεί, αφού μετά απ' αυτήν κρίνεται απαραίτητη και η απομάκρυνση του άλατος που έχει προσροφηθεί στο έδαφος. Επομένως μια σωστή υδρολογική μελέτη κρίνεται απαραίτητη για την αποφυγή της εισροής της θάλασσας στο έδαφος.
- ◆ Στις παράκτιες περιοχές, όπως είναι και η περιοχή μελέτης μας, τα αποθέματα του υδροφορέα συνήθως είναι ελάχιστα. Επομένως η ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων είναι απαραίτητη ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκμετάλλευσης (πτώση υδροφόρου ορίζοντα, διείσδυση της θάλασσας και υφαλμύριση των παράκτιων εδαφών, καθιζήσεις εδαφών).
- ◆ Για την καλύτερη προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής είναι απαραίτητα και στοιχεία τα οποία αφορούν την υδρογεωλογία της περιοχής. Τα στοιχεία που εισάγαμε στο μοντέλο αφορούσαν μόνο το επιφανειακό στρώμα. Για την καλύτερη βαθμονόμηση λοιπόν ίσως θα έπρεπε να γίνει μελέτη των τομών της περιοχής, ούτως ώστε να διαπιστωθεί αν η γεωλογία της αποτελείται από ένα μόνο ή παραπάνω στρώματα.
- ◆ Σε περίπτωση που αντιμετωπίζαμε πρόβλημα υφαλμύρισης θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μέθοδο εμπλουτισμού των υδάτων με πηγάδια εισαγωγής, στα οποία μάλιστα θα διοχετεύονταν οι εκροές βιολογικού καθαρισμού. Μετά την περαιτέρω επεξεργασία τους ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις της νομοθεσίας, θα ήταν μια λύση στο πρόβλημα της διαθεσής τους.
- ◆ Η κατασκευή φραγμάτων δεν ενδείκνυται για τη χώρα μας γιατί εκτός του υψηλού κόστους κατασκευής τους, δεν είναι εξασφαλισμένη η αποτελεσματικότητά τους εξαιτίας της έντονης σεισμικότητας της περιοχής.
- ◆ Απαραίτητη κρίνεται η εκπόνηση μελετών και έργων για την αξιοποίηση των επιφανειακών υδάτων, ώστε να αποφεύγεται η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων. Πολύ σημαντικό επίσης είναι να γνωρίζουμε τα υδατικά ισοζύγια και το υδατικό δυναμικό του υπόγειου υδροφορέα από υδρογεωλογικές έρευνες και μελέτες.

- ♦ Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης η συνολική αντιμετώπιση, ο σχεδιασμός και προγραμματισμός των επικείμενων έργων κάθε περιοχής με βάση τις συνολικές ανάγκες της και όχι τα εκάστοτε συμφέροντα. Γενικά, δηλαδή, η εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων απαιτεί συνεχή επιστημονική και τεχνική παρακολούθηση και διαρκή επανεκτίμηση των όρων, συνθηκών και έργων εκμετάλλευσης.
- ♦ Από τα σενάρια που εξετάστηκαν πιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα έδωσε το 2^ο σενάριο, καθώς με την μείωση της άντλησης των γεωτρήσεων το μέτωπο της υφαλμύρινης μετακινήθηκε με τέτοιο τρόπο που να μην επηρεάζει την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής και μάλιστα περισσότερο από το 1^ο σενάριο, σε σημείο δηλαδή να προκαλεί βελτίωσή της. Εφ'όσον δηλαδή οι γεωτρήσεις συνεχίζουν να παραμένουν εκτός του μετώπου της υφαλμύρινης, η μείωση του ρυθμού άντλησης προστατεύει τον υπόγειο υδροφόρα από υπερεκμετάλλευση και πιθανή εξάντληση των αποθεμάτων του.
- ♦ Στις παράκτιες περιοχές οι οποίες αποτελούνται κυρίως από αμμώδη και αργιλώδη εδάφη, η αντιμετώπιση του φαινομένου είναι πρακτικά αδύνατη.
- ♦ Πριν από την επιλογή οποιουδήποτε σεναρίου για την αντιμετώπιση του φαινομένου κρίνεται απαραίτητη η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου που να περιλαμβάνει όλες τις περιοχές του νομού Λασιθίου με πιθανό πρόβλημα υφαλμύρωσης και να δίνει τη βέλτιστη λύση για το σύνολο της παράκτιας ζώνης

Βιβλιογραφία

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press. 1992.
2. Chunmiao Zheng, Cordon D. Bennet, Applied Groundwater Modeling Theory and Practice.
3. Γεώργιος Π. Καρατζάς, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
4. D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.
5. Chester D. Rail, Groundwater Contamination, Technomic Publishing Company, 1989.
6. Γεώργιος Χ. Σούλιος, Γενική Υδρογεωλογία, University Studio Press, 1986.
7. Τριχάκης Ιωάννης, Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης στη Βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Διπλωματική εργασία, Χανιά, 2004.
8. Α. Νάνου-Γιάνναρου, Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων, Συμπόσιο «ΑΙΓΑΙΟ-ΝΕΡΟ-ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ», Πάρος, 2001.
9. J. Bear, Hydraulics of Groundwater, Mcgraw-Hill, 1979.
10. Βιδάκης Μ., Γαλανάκης Δ., Μυλωνάκης Ι., Παπαζέτη Ε., Πομόνη-Παπαϊωάννου Φ., Σκουρτσή-Κορωναίου Β., Η γεωλογική δομή των περιοχών Σητείας-Λιθινών, Ανατολική Κρήτη, Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα, 1995.
11. Ζερβαντωνάκης Κ., Ο ορυκτός πλούτος της Κρήτης και ειδικότερα της επαρχίας Σητείας-Αν. Κρήτης, Ι.Γ.Μ.Ε.
12. Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου, Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε.
13. Pinder and Gray, Finite elements in water resources, 1977.
14. Lapidus and Pinder, Numerical solutions of partial differential equations in science and engineering, 1982.

Ιστοσελίδες

15. www.water.usgs.gov
16. www.emy.gr

17. www.europa.eu.int
18. www.meteo.gr
19. www.crete-region.gr
20. www.google.com

Παράρτημα

- Ορθοφωτοχάρτες γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.
- Τομές υδρευτικών γεωτρήσεων Δ.Ε.Υ.Α. Σητείας.
- Απεικόνιση πετρογραφίας γεωτρήσεων πάνω στην περιοχή μελέτης.
- Χάρτης απογραφής σημείων ύδατος.
- Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας-Σητεία.
- Γεωγραφικός χάρτης Σητείας.

Υπόμνημα Ορθοφωτοχαρτών

A/A Ορθοφωτοχάρτη	Γεωτρήσεις που απεικονίζονται
688-897/5	Αγ. Γεώργιος-Νταουσός 1 (ΜΙΚΡΗ)
	Αγ. Γεώργιος-Νταουσός 2 (ΜΕΓΑΛΗ)
688-894/5	Μάναρη-Περιστεράς
688-891/5	Αβελιακός
	Χαλέπα
	Αρμούλες-Σταυρακάκη
	Γκιρλής
	Πηγή Ζου
684-891/5	Πηνί-Δάσος-Παρασπόρι
	Πηνί-Δάσος-Χαμέζιο